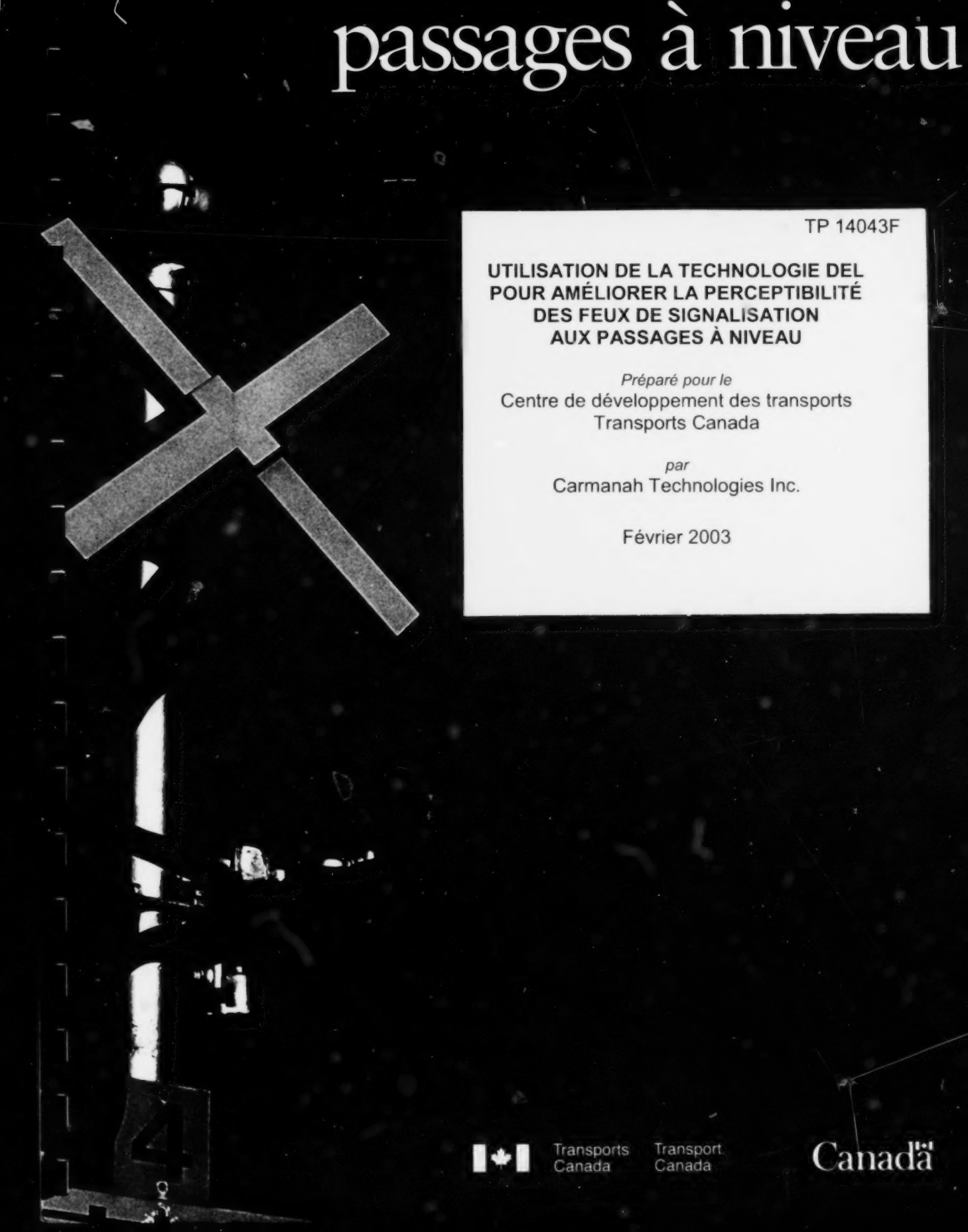
passages à niveau



TP 14043F

UTILISATION DE LA TECHNOLOGIE DEL POUR AMÉLIORER LA PERCEPTIBILITÉ DES FEUX DE SIGNALISATION AUX PASSAGES À NIVEAU

Préparé pour le
Centre de développement des transports
Transports Canada

par
Carmanah Technologies Inc.

Février 2003

Transports Canada Transport Canada

Canada

103-05519/

TP 14043F

UTILISATION DE LA TECHNOLOGIE DEL POUR AMÉLIORER LA PERCEPTIBILITÉ DES FEUX DE SIGNALISATION AUX PASSAGES À NIVEAU

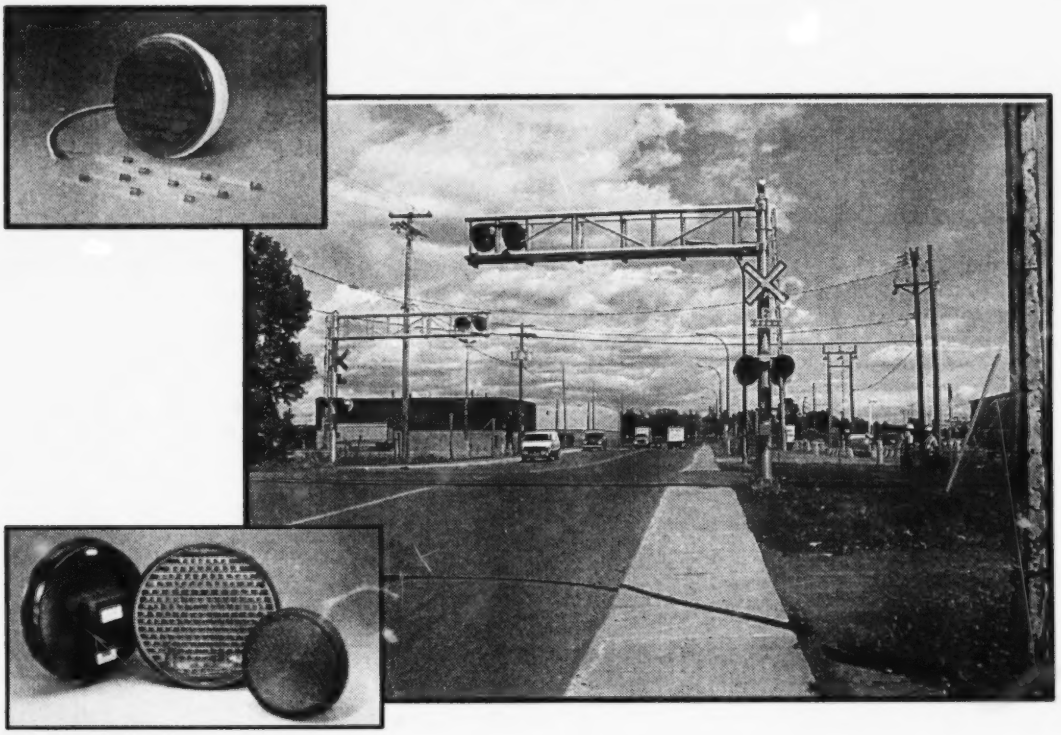
Préparé pour le
Centre de développement des transports
Transports Canada

par
Carmanah Technologies Inc.

Février 2003

TP 14043F

UTILISATION DE LA TECHNOLOGIE DEL POUR AMÉLIORER LA PERCEPTIBILITÉ DES FEUX DE SIGNALISATION AUX PASSAGES À NIVEAU



par

David Green, Ph.D., ing.
Miruska Milanovic, B. ing.
Carmanah Technologies Inc.
Victoria (C.-B.)

Février 2003

AVIS

Ce rapport reflète les opinions des auteurs qui ne sont pas nécessairement celles du Centre de développement des transports de Transports Canada ou des organismes parrains.

Les organismes parrains n'avalisent ni les produits ni leurs fabricants. Les marques de commerce ou les noms de fabricants mentionnés dans ce rapport n'y figurent que parce qu'ils sont essentiels aux objectifs visés.

Étant donné que certaines unités de mesures utilisées dans l'industrie sont des unités anglo-saxonnes, les unités métriques ne sont pas toujours utilisées dans ce rapport.

PARTENAIRES FINANCIERS

Direction 2006, Programme de recherche sur les passages à niveau

Transports Canada
Association des chemins de fer du Canada
Canadien National
Canadien Pacifique
VIA Rail Canada Inc.
Alberta Transportation
Ministère des Transports du Québec

Also available in English under the title : «*LED Technology for Improved Conspicuity of Signal Lights at Highway-Railway Grade Crossings*», TP 14043E.

Transports Canada Transport Canada

FORMULE DE DONNÉES POUR PUBLICATION

1. N° de la publication de Transports Canada	2. N° de l'étude	3. N° de catalogue du destinataire
TP 14043F	9930	

4. Titre et sous-titre

Utilisation de la technologie DEL pour améliorer la perceptibilité des feux de signalisation aux passages à niveau

5. Date de la publication

Février 2003

6. N° de document de l'organisme exécutant

7. Auteur(s)

David Green et Miruska Milanovic

8. N° de dossier - Transports Canada

ZCD2450-D-718-7

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant

Carmanah Technologies Inc.
203 Harbour Road, Bldg 4
Victoria, British Columbia
Canada V9A 3S2

10. N° de dossier - TPSGC

MTB-0-00878

11. N° de contrat - TPSGC ou Transports Canada

T8200-000520/001/MTB

12. Nom et adresse de l'organisme parrain

Centre de développement des transports (CDT)
800, boul. René-Lévesque Ouest
Bureau 600
Montréal (Québec) H3B 1X9

Direction de la sécurité ferroviaire
330, rue Sparks
Tour C, Place de Ville
Ottawa (Ontario) K1A 0N5

13. Genre de publication et période visée

Final

14. Agent de projet

S. Vespa

15. Remarques additionnelles (programmes de financement, titres de publications connexes, etc.)

Coparrainé par les partenaires financiers du Programme de recherche sur les passages à niveau de Direction 2006 : Association des chemins de fer du Canada, Canadien National, Canadien Pacifique, Via Rail Canada Inc., Alberta Transportation et le ministère des Transports du Québec

16. Résumé

L'intention du projet était d'établir une norme de performance nationale visant les feux de signalisation à diodes électroluminescentes (DEL) aux passages à niveau.

La première phase du projet consistait à examiner les normes courantes de performance des signaux lumineux à incandescence utilisés aux passages à niveau et en signalisation routière. En consultation avec une large coupe de groupes intéressés, on a défini les critères de base d'une nouvelle norme qui s'appliquerait aux feux à DEL destinés aux passages à niveau.

Il a fallu ensuite mener une recherche documentaire scientifique et technique sur les DEL, sur les facteurs humains et sur les besoins des conducteurs. Les documents ont été résumés puis analysés, ce qui a débouché sur un projet de norme de performance renfermant des spécifications concernant l'intensité lumineuse et la forme du faisceau de lumière, de même que des exigences relatives aux composants électriques, aux composants mécaniques et à l'assurance de la qualité.

La norme a fait l'objet d'essais en laboratoire et de trois expériences sur le terrain. Le but était de déterminer la faisabilité de la norme puis de comparer les feux de signalisation à DEL avec les feux existants, à incandescence, pour évaluer l'efficacité de la norme. Les résultats ont indiqué que la technologie DEL actuelle pourrait satisfaire aux conditions énoncées, et ils ont démontré clairement qu'elle donne une performance supérieure.

Selon la norme, les feux de signalisation devront produire une intensité lumineuse de 400 cd, mesurée dans l'axe du faisceau lumineux, et ce, dans toutes les conditions possibles de service et pendant toute la durée de vie du produit. La forme du faisceau doit présenter des caractéristiques égales ou supérieures à celles prévues par les exigences internationales concernant les feux de circulation routière, ce qui signifie une distribution de lumière plus étendue qu'avec les feux de signalisation ferroviaire existants.

Le projet a permis d'élaborer une norme de performance vérifiable pour la mise en place de feux à DEL afin de garantir une meilleure perceptibilité des signaux lumineux aux passages à niveau.

17. Mots clés	18. Diffusion
Passage à niveau, diode électroluminescente, DEL, norme, feux de signalisation, signaux lumineux, passage à niveau, intensité lumineuse, faisceau lumineux, spécifications photométriques	Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.

19. Classification de sécurité (de cette publication)	20. Classification de sécurité (de cette page)	21. Déclassification (date)	22. Nombre de pages	23. Prix
Non classifiée	Non classifiée	—	xiv, 124, ann.	Port et manutention

Transport Canada / Transports Canada

PUBLICATION DATA FORM

1. Transport Canada Publication No.	2. Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 14043F	9930	

4. Title and Subtitle	5. Publication Date
Utilisation de la technologie DEL pour améliorer la perceptibilité des feux de signalisation aux passages à niveau	February 2003
	6. Performing Organization Document No.

7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
David Green and Miruska Milanovic	ZCD2450-D-718-7

9. Performing Organization Name and Address	10. PWGSC File No.
Carmanah Technologies Inc. 203 Harbour Road, Bldg 4 Victoria, British Columbia Canada V9A 3S2	MTB-0-00878
	11. PWGSC or Transport Canada Contract No.
	T8200-000520/001/MTB

12. Sponsoring Agency Name and Address		13. Type of Publication and Period Covered
Transportation Development Centre (TDC) 800 René Lévesque Blvd. West Suite 600 Montreal, Quebec H3B 1X9	Rail Safety Directorate 330 Sparks Street Tower C, Place de Ville Ottawa, Ontario K1A 0N5	Final
		14. Project Officer
		S. Vespa

15. Supplementary Notes (Funding programs, titles of related publications, etc.)

Co-sponsored by the funding partners of the Direction 2006 Highway-Railway Grade Crossing Research program: Railway Association of Canada, Canadian National Railway, Canadian Pacific Railway, VIA Rail Canada Inc., Alberta Transportation, and the ministère des Transports du Québec

16. Abstract

The purpose of this project was to establish a national performance standard for LED signal lights at highway-railway grade crossings.

The project first examined the existing performance standards for incandescent signal lights for grade crossings and traffic lights. In consultation with a broad spectrum of stakeholders, basic criteria were established for a new standard that would apply to LED signal lights at grade crossings.

The scientific and technical literature on LEDs, human factors, and driver requirements was then summarized and analyzed, resulting in a tentative performance standard that specified light output and beam pattern, as well as electrical, mechanical and quality assurance requirements.

This standard was tested in the laboratory and in three field experiments to determine its feasibility and its effectiveness relative to existing incandescent signal lights. The results showed that the performance requirements could be met by existing LED technology, and clearly demonstrated the superior performance of the LED signal lights.

The standard requires that LED signal lights produce 400 cd light output, on axis, under all conditions likely to be encountered in the field and over the lifetime of the product. The beam pattern must equal or exceed international traffic light requirements, resulting in a much broader beam pattern than existing railway requirements.

In conclusion, a verifiable performance standard was developed that provides for improved conspicuity of grade crossing signal lights through the adoption of LED technology.

17. Key Words	18. Distribution Statement
Highway-railway grade crossing, light-emitting diode, LED, railway crossing light standard, luminous intensity, light beam pattern, photometric specifications	Limited number of copies available from the Transportation Development Centre

19. Security Classification (of this publication)	20. Security Classification (of this page)	21. Declassification (date)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	—	xiv, 124, apps	Shipping/ Handling

SOMMAIRE

Les passages à niveau présentent un danger important pour les conducteurs et comptent pour environ 300 accidents et 50 décès annuellement au Canada. Les feux de signalisation qui sont activés par l'approche d'un train sont l'élément le plus important des systèmes d'avertissement de passages à niveau. De récentes améliorations dans la technologie des diodes électroluminescentes (DEL) ont permis de mettre au point des feux à DEL plus perceptibles que les feux à incandescence actuels, tout en offrant des avantages de fonctionnement importants. Transports Canada a restreint l'utilisation des feux à DEL au Canada en attendant l'élaboration d'une norme justifiable appropriée. Le présent document est le résultat d'une étude d'une année visant à élaborer une telle norme.

Contexte

En général, on s'attendrait à ce que les feux de passage à niveau et les feux de circulation se conforment à des spécifications semblables, étant donné qu'ils ont à peu près la même fonction, celle d'arrêter la circulation. Toutefois, les feux de passage à niveau sont différents des feux de circulation sur un point important : par règlement, les feux de passage à niveau doivent pouvoir fonctionner sur une batterie de secours durant des périodes très longues en cas de panne de secteur. Il n'y a pas d'exigence correspondante pour les feux de circulation. C'est pourquoi les feux de circulation installés sur les routes à circulation rapide utilisent des ampoules de 150 W, tandis que les feux de passage à niveau utilisent des ampoules de 18 W afin d'économiser l'énergie.

Pour obtenir une intensité lumineuse suffisante avec une ampoule de 18 W, les feux de passage à niveau utilisent un miroir parabolique qui focalise le faisceau dirigé vers l'automobiliste. Il y a donc de grandes différences entre les diagrammes de rayonnement des feux de circulation et des feux de passage à niveau, ces derniers ayant un faisceau beaucoup plus étroit et plus concentré. Ces faisceaux étroits exigent un alignement précis des ampoules lumineuses ainsi que des boîtiers des feux, ce qui à son tour exige des structures capables de maintenir les boîtiers bien alignés.

La technologie DEL offre une efficacité énergétique beaucoup plus grande et permet de «monter la barre» dans les spécifications photométriques des feux de passage à niveau, ce qui augmente la sécurité des conducteurs.

Consultation avec les intervenants

Afin de déterminer la meilleure façon de «monter la barre» dans les spécifications photométriques des feux de passage à niveau, cette étude a tenu de vastes consultations avec les organismes de réglementation des chemins de fer et de la circulation routière, l'industrie ferroviaire, la communauté scientifique, et les fabricants de feux de passage à niveau et de feux de circulation. Un comité directeur comportant des représentants de chacun de ces intervenants s'est rencontré régulièrement au cours de ce projet, et les rapports provisoires et les projets de normes ont été affichés sur le Web (railwaycrossings.com) pour être examinés et commentés par un public plus vaste.

Les principes et objectifs suivants ont été établis à partir des consultations avec les intervenants et ont été utilisés dans l'élaboration de la norme. Les intervenants s'accordaient à dire que la norme devrait :

- être basée sur les besoins des conducteurs en tenant compte des facteurs humains;
- spécifier l'utilisation d'un faisceau de rayonnement large afin qu'un alignement exact ne soit pas indispensable et que l'on puisse utiliser les structures porteuses standard des feux de circulation;
- satisfaire aux exigences actuelles touchant les feux de passage à niveau, tel que mentionné dans la dernière version des spécifications recommandées pour les feux à incandescence, ou les dépasser;
- satisfaire aux spécifications les plus rigoureuses pour les feux de circulation à grand angle d'ouverture des routes à circulation rapide, ou les dépasser;
- être une spécification universelle pour les feux avant, arrière et en porte-à-faux afin d'éviter d'utiliser des modules de signalisation différents;
- être une norme mesurable et quantifiable qui peut être appliquée durant toute la durée de vie du feu de signalisation;
- être confirmée par des tests en laboratoire et sur le terrain;
- avoir la même spécification pour les feux de 200 et de 300 mm.

Examen des normes

L'étude a commencé par un examen et une comparaison des normes sur les feux de passage à niveau et les feux de circulation, et leur évolution au cours des années. La littérature scientifique a également été examinée et résumée pour montrer comment les normes ont été élaborées. L'examen des normes a fourni l'information de base qui a servi à l'élaboration de la nouvelle norme proposée.

Discussion relative aux facteurs humains

Il était important d'examiner la littérature scientifique sur les DEL afin de déterminer si la lumière produite par les DEL est moins perceptible que celle produite par les feux à incandescence, ce qui ferait augmenter les exigences par rapport à celles imposées aux feux à incandescence. On a examiné les caractéristiques de la lumière produite par des DEL rouges comparativement à la lumière produite par les ampoules à incandescence équipées d'un filtre rouge. On a examiné les effets de ces caractéristiques sur les daltoniens, les conducteurs qui portent des lunettes de soleil, les yeux vieillissants, la visibilité quand les conducteurs sont soumis à un effet fantôme et la visibilité dans le brouillard. L'examen a conclu qu'on peut s'attendre à ce que les modules de signalisation à DEL soient plus performants que les feux de signalisation à incandescence de même intensité lumineuse à cause de deux avantages inhérents :

1) les feux à DEL produisent une lumière rouge pure qui est plus perceptible par l'œil humain;
2) les feux à DEL peuvent s'allumer et s'éteindre instantanément (tant que cette capacité n'est pas compromise par l'alimentation), ce qui améliore la distance à laquelle les feux clignotants peuvent être perçus.

Par conséquent, on peut s'attendre à ce que les feux à DEL offrent une plus grande marge de perceptibilité que des feux à incandescence de même intensité lumineuse.

L'examen des facteurs humains a également permis d'établir la limite supérieure pour l'intensité lumineuse la nuit; celle-ci est la limite supérieure clé en ce qui concerne l'intensité lumineuse des feux de signalisation.

Discussion des besoins des conducteurs

Un examen des besoins des conducteurs aux passages à niveau a été effectué pour déterminer si, aux passages à niveau, les conducteurs ont des besoins nettement différents de leurs besoins aux feux de circulation. Cette étude a conclu que les spécifications pour les feux de circulation étaient bien adaptées aux passages à niveau et qu'il n'y avait aucune raison fondamentale d'utiliser des spécifications différentes dans ces deux applications.

Discussion des expériences de laboratoire

Dans l'établissement de la norme, on a cru que celle-ci pourrait être si élevée que les constructeurs ne pourraient y satisfaire. Un certain nombre de types de feux à DEL, généralement des prototypes, ont été obtenus de divers fabricants. Quatre ont été testés sur tous les aspects de la norme proposée. Les expériences de laboratoire ont montré que trois des fabricants pouvaient satisfaire à la norme avec des modifications mineures de leurs alimentations, et que, pour satisfaire aux exigences concernant le diagramme de rayonnement, ceux-ci pouvaient utiliser les lentilles actuelles conçues pour les feux de circulation.

Discussion des expériences sur le terrain

Les directives concernant les feux à incandescence des passages à niveau spécifient la distance de visibilité des feux, laquelle ne peut être déterminée que par des expériences sur le terrain. L'étape finale du projet a consisté à effectuer trois expériences différentes sur le terrain avec trois groupes échantillons différents. Les expériences sur le terrain ont montré que les feux à DEL ayant l'intensité lumineuse requise dépassaient facilement les exigences concernant la distance de visibilité. De plus, ils ont également montré la supériorité des feux à DEL sur les feux à incandescence traditionnels.

Description de la norme

La norme recommandée harmonise les spécifications relatives aux feux de passages à niveau avec les spécifications relatives aux feux de circulation à grand angle d'ouverture des routes à circulation rapide d'Amérique du Nord et d'Europe.

De plus, le diagramme de rayonnement recommandé pour les feux de circulation est suffisamment large et universel pour permettre à un seul module de signalisation à DEL de satisfaire aux exigences de performance pour les feux en porte-à-faux, les feux installés sur le bord de la route, et les «feux arrière» montés sur le côté opposé de la voie, ce qui élimine l'obligation d'utiliser un oculaire particulier à chaque application. En outre, l'utilisation d'un faisceau large réduit les vérifications d'alignement des feux et permet d'utiliser les structures plus économiques et plus sécuritaires des feux de circulation pour l'installation des boîtiers des feux de passage à niveau.

L'une des caractéristiques clés de cette norme est que les valeurs spécifiées doivent être «conservées» durant toute la durée de vie de l'unité et dans toutes les conditions de fonctionnement normales, y compris quand l'unité est alimentée par une batterie de secours.

La norme spécifiant des valeurs qui doivent être «conservées», on peut tester les modules de signalisation à tout moment pour s'assurer qu'ils satisfont aux exigences concernant l'intensité et le diagramme de rayonnement.

Application de la norme

Les spécifications photométriques clés élaborées dans cette étude doivent être publiées sous la forme d'une norme nationale par Transports Canada dans le document RTD 10, Passages à niveau rail-route.

Un second document, une spécification d'achat, a également été préparé. Il contient des exigences détaillées portant sur les aspects électriques, mécaniques et environnementaux ainsi que l'assurance de la qualité, qui visent à garantir que les modules de signalisation à DEL seront conformes aux spécifications photométriques de la norme dans toutes les conditions de fonctionnement normales actuelles des chemins de fer canadiens.

L'application de cette nouvelle norme pour les feux de signalisation à DEL élèvera la performance des feux de passage à niveau au même niveau que celle des feux de circulation à grand angle d'ouverture des routes à circulation rapide, et augmentera par conséquent la sécurité des conducteurs.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION 1

2. SPÉCIFICATIONS PHOTOMÉTRIQUES ACTUELLES POUR LES FEUX DE SIGNALISATION AUX PASSAGES À NIVEAU 3
   - 2.1 Justification de cette norme 13

3. SPÉCIFICATIONS PHOTOMÉTRIQUES ACTUELLES POUR LES FEUX DE CIRCULATION 15
   - 3.1 Norme de l'Institute of Transportation Engineers (ITE) 15
   - 3.2 Norme européenne 17
   - 3.3 Norme australienne 18
   - 3.4 Comparaison de diverses normes sur les feux de circulation 19
   - 3.5 Conclusions quant à la situation actuelle des normes 20

4. SITUATION DE LA TECHNOLOGIE DEL 21
   - 4.1 Avantages des DEL eut égard à l'intensité lumineuse 25
   - 4.2 Diagrammes de rayonnement des feux à DEL 26
   - 4.3 Utilisation des DEL dans les feux de circulation 26
   - 4.4 Résultats de l'utilisation de modules à DEL aux passages à niveau 27

5. FACTEURS HUMAINS 29
   - 5.1 Daltonisme 29
   - 5.2 Lunettes de soleil 32
   - 5.3 Vieillissement de l'oeil 32
   - 5.4 Effet fantôme 33
   - 5.5 Brouillard 33
   - 5.6 Fréquence de clignotement 34
   - 5.7 Temps de montée et temps de descente 35
   - 5.8 Réponse logarithmique de l'oeil 36
   - 5.9 Taille des feux 39
   - 5.10 Écran de visibilité 39
   - 5.11 Intensité lumineuse excessive 40
   - 5.12 Conclusions sur les facteurs humains 40

6. BESOINS DES CONDUCTEURS 41
   - 6.1 Calcul de l'intensité lumineuse requise d'après les besoins des conducteurs 44
   - 6.2 Conclusions sur les exigences pour les conducteurs 51

7. EXPÉRIENCES SUR LE TERRAIN ET EN LABORATOIRE 53
   - 7.1 Expérience sur le terrain n° 1 58
   - 7.2 Expérience sur le terrain n° 2 65
   - 7.3 Expérience sur le terrain n° 3 71
   - 7.4 Comparaison en laboratoire des intensités lumineuses de 400 et 600 cd 77

8. RÉTROACTION DES INTERVENANTS 79
   - 8.1 Commentaires généraux sur les feux à incandescence 79
   - 8.2 Commentaires généraux pour l'établissement d'une norme sur les feux à DEL 79

9. EXIGENCES PHOTOMÉTRIQUES 81
9.1 Principes/objectifs de l'établissement des exigences photométriques 81
9.2 Examen des normes 81
9.3 Examen des facteurs humains 82
9.4 Examen des besoins des conducteurs 82
9.5 Examen de la littérature scientifique 83
9.6 Examen des essais en service réel 83
9.7 Consultation avec les intervenants 83
9.8 Exigences photométriques proposées 84
9.9 Comparaison détaillée aux exigences photométriques liées aux feux de circulation 84
9.10 Comparaison détaillée aux normes antérieures sur la photométrie ferroviaire 93
9.11 Comparaison aux diagrammes de rayonnement de divers échantillons de modules de signalisation à DEL 93
9.12 Exigences relatives à la chromaticité 93
9.13 Exigences relatives à l'uniformité 98
9.14 Exigences relatives au temps d'allumage 98

10. EXIGENCES ENVIRONNEMENTALES 101
10.1 Température 101
10.2 Fonctionnement en continu 102
10.3 Vieillissement 103

11. EXIGENCES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES 105
11.1 Conception du module 105
11.2 Vibration 106

12. EXIGENCES ÉLECTRIQUES 107
12.1 Intensité lumineuse en fonction de la tension 107
12.2 Surtension 108
12.3 Consommation de courant 108
12.4 Défaillance d'une DEL 109
12.5 Appel de courant 110

13. ASSURANCE DE LA QUALITÉ 113
13.1 Essai de qualification de la conception 113
13.2 Essai d'assurance de la qualité de la production 114

14. CONCLUSION 115

15. RECOMMANDATIONS 117

BIBLIOGRAPHIE 119

ANNEXE A Texte intégral de la norme recommandée
ANNEXE B Spécification d'achat
ANNEXE C Liste des intervenants

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Panneau d'avertissement	3
Figure 2	Système d'avertissement avec barrière	5
Figure 3	Comparaison de l'intensité lumineuse dans l'axe entre différentes normes sur les feux de circulation	19
Figure 4	Comparaison des normes de différents pays (300 mm)	20
Figure 5	Comparaison de l'efficacité lumineuse des DEL rouges et des ampoules à incandescence	21
Figure 6	Construction d'une diode électroluminescente typique	22
Figure 7	Baisse prévue de l'intensité lumineuse moyenne des DEL AlInGaP basée sur les données obtenues dans une période d'utilisation à haute température de 16 000 heures	23
Figure 8	Baisse prévue à long terme de l'intensité lumineuse pour divers courants d'alimentation continus	23
Figure 9	Fiabilité des éléments d'un feu de circulation	24
Figure 10	Flux lumineux en fonction de la température ambiante pour une diode rouge typique AlInGaP alimentée avec un courant constant	25
Figure 11	Exemples de dispositions de DEL dans les feux de circulation	27
Figure 12	Exemple de module de signalisation	27
Figure 13	Spectre d'une DEL rouge (AlInGaP) comparé à celui d'une source à incandescence avec un filtre rouge	29
Figure 14	Sensibilité relative de l'œil d'un «observateur standard» hypothétique à différentes longueurs d'onde pour des niveaux d'éclairage normaux (courbe photopique de la CIE)	30
Figure 15	Stimulation de la population photo-sensible en fonction de la fréquence de clignotement	35
Figure 16	Intensité lumineuse des feux de freinage en fonction du temps après leur mise sous tension	36
Figure 17	Comparaison des intensités lumineuses effectives de feux à montées instantanée et lente	36
Figure 18	Intensité lumineuse en fonction de la luminosité subjective	37
Figure 19	Comparaison des interprétations linéaire et logarithmique des données	38
Figure 20	Cône de vision vertical	42
Figure 21	Cône de vision horizontal	44
Figure 22	Portée diurne en fonction de l'intensité lumineuse d'après l'algorithme pour les feux de signalisation maritime	48
Figure 23	Portée nocturne en fonction de l'intensité lumineuse d'après l'algorithme pour les feux de navigation maritime	49
Figure 24	Diagramme de rayonnement de la paire de modules à diodes n° 1	54
Figure 25	Diagramme de rayonnement de la paire de modules à diodes n° 2	55
Figure 26	Diagramme de rayonnement de la paire de modules à diodes n° 3	56
Figure 27	Diagramme de rayonnement de la paire de modules à diodes n° 4	57

Figure 28 Diagramme de rayonnement d'une paire de modules à incandescence de 8 po anciens et hors service (oculaire 30-15°, ampoule de 18 W, test à 10,5 V) 58

Figure 29 Vue du champ de tir Heal en direction de la berme à cibles 59

Figure 30 Feux installés sur la berme à cibles du champ de tir 59

Figure 31 Vue de côté de l'installation de test des feux 60

Figure 32 Vue arrière d'un chevalet 60

Figure 33 Le groupe échantillon observant les feux 62

Figure 34 Diagramme de rayonnement des nouveaux feux à incandescence de 8 po (oculaire 30-15°, ampoule de 18 W sous tension de 10,5 V) 66

Figure 35 Installation de montage des nouveaux modules à incandescence 67

Figure 36 Le groupe échantillon évaluant les feux, expérience sur le terrain n° 2 68

Figure 37 Installation de montage des modules à incandescence 72

Figure 38 Montage de l'expérience avec les feuilles réfléchissantes installées derrière les feux 73

Figure 39 Un sous-groupe échantillon se rend à un autre point d'observation 75

Figure 40 Graphiques tridimensionnels de diverses normes 86

Figure 41 Comparaison entre les exigences photométriques proposées et différentes normes sur la photométrie des feux de circulation 88

Figure 42 Comparaison entre les exigences photométriques proposées et différentes normes antérieures sur la photométrie ferroviaire 94

Figure 43 Comparaison entre les exigences photométriques proposées et des échantillons de modules de signalisation à DEL 96

Figure 44 Changement de l'intensité lumineuse par rapport aux augmentations de température et comparativement à la norme proposée 101

Figure 45 Changement de l'intensité lumineuse au fil du temps comparativement à la norme proposée 103

Figure 46 Changement de l'intensité lumineuse en fonction de la tension, comparativement à la norme proposée 108

Figure 47 Consommation de courant par rapport à l'appel de courant maximal recommandé de 2 A 109

Figure 48 Appel de courant dans les modules d'essai de signalisation à DEL 110

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Changements prévus dans le temps de réaction moyen, les signaux non aperçus, l'intensité lumineuse nominale et la perceptibilité nominale résultant de la réduction de 15 % de la luminosité des DEL dans les spécifications de l'ITE (tableau partiel)	17
Tableau 2	Intensités lumineuses (I) des feux de signalisation rouge, jaune et vert dans l'axe de référence	17
Tableau 3	Faisceau large (type W)	18
Tableau 4	Distribution des intensités lumineuses des feux à grande portée	18
Tableau 5	MTBF et taux de défaillance de DEL à technologie AlInGaP sous boîtier T-1 ¾	22
Tableau 6	Classification et fréquence d'occurrence des systèmes héréditaires de perception des couleurs	31
Tableau 7	Alignement des feux avant	41
Tableau 8	Angles verticaux et horizontaux d'approche d'un feu monté sur un mât	42
Tableau 9	Angles verticaux et horizontaux d'approche d'un feu en porte-à-faux	43
Tableau 10	Caractéristiques photométriques des modules à diodes choisis	53
Tableau 11	Intensité lumineuse mesurée pour la paire à diodes électroluminescentes n° 1	54
Tableau 12	Intensité lumineuse mesurée pour la paire à diodes électroluminescentes n° 2	55
Tableau 13	Intensité lumineuse mesurée pour la paire à diodes électroluminescentes n° 3	56
Tableau 14	Intensité lumineuse mesurée pour la paire à diodes électroluminescentes n° 4	57
Tableau 15	Intensité lumineuse mesurée sur la paire de modules à incandescence de 8 po anciens	58
Tableau 16	Liste des points d'évaluation dans l'expérience sur le terrain n° 1	61
Tableau 17	Intensité lumineuse mesurée pour les nouveaux feux à incandescence de 8 po	66
Tableau 18	Description du groupe échantillon diurne	67
Tableau 19	Description du groupe échantillon nocturne	67
Tableau 20	Points d'évaluation pour l'expérience sur le terrain n° 2	68
Tableau 21	Intensités lumineuses pour chaque paire de feux	74
Tableau 22	Points d'évaluation pour l'expérience sur le terrain n° 3	74
Tableau 23	Test de laboratoire : groupe échantillon quittant le laboratoire et y retournant	78
Tableau 24	Intensité lumineuse minimale (cd) par rapport à la température et à la durée de vie	84
Tableau 25	Comparaison entre les exigences photométriques proposées et les diagrammes de rayonnement des feux de circulation en usage en Europe/ITE	85
Tableau 26	Régions de chromaticité recommandées par différentes normes	98

1. INTRODUCTION

Les diodes électroluminescentes (DEL) constituent une nouvelle technologie fiable et robuste qui offre un éclairage beaucoup plus efficace dans certains types d'applications. L'utilisation des DEL dans des applications telles que les feux de navigation, les feux de circulation et les feux de freinage de véhicules s'étend rapidement. Du fait de la rapidité des changements dans la technologie des DEL, il est devenu difficile pour les organismes de réglementation de suivre le rythme, mais il est évident que les DEL offrent des améliorations très importantes en ce qui concerne la fiabilité et la consommation d'énergie, et que leur utilisation doit être encouragée. Pour les feux de circulation, on utilise des modules à DEL afin de réduire la consommation d'énergie, tout en se conformant aux normes imposées aux sources lumineuses traditionnelles à incandescence. Dans le cas des feux de signalisation aux passages à niveau, les DEL permettent d'améliorer la performance sans augmenter la consommation d'énergie.

Transports Canada a la responsabilité d'appliquer des normes efficaces pour les feux de signalisation aux passages à niveau. Reconnaissant les améliorations que les DEL peuvent apporter en matière de sécurité et de fiabilité, Transports Canada a conclu un marché avec Carmanah Technologies Inc. pour examiner les normes actuellement en vigueur au Canada pour les feux de signalisation aux passages à niveau et recommande des changements qui profiteront de la nouvelle technologie des diodes électroluminescentes.

Ce rapport examine les normes relatives aux feux de signalisation aux passages à niveau et aux feux de circulation en Amérique du Nord et ailleurs, les facteurs humains dans l'utilisation de DEL dans les feux d'avertissement, les besoins des conducteurs, la littérature scientifique et les résultats des consultations avec les intervenants. Ces sources de renseignements réduisent considérablement la gamme des intensités lumineuses pour la norme sur les diodes électroluminescentes. Le rapport se termine par un résumé d'une série d'expériences en laboratoire et sur le terrain qui mènent aux conclusions sur les caractéristiques photométriques exigées des feux à DEL aux passages à niveau. Le texte intégral de la norme est proposé, y compris les exigences physiques, mécaniques, électriques et environnementales, ainsi que les procédures d'assurance de la qualité recommandées pour garantir la conformité à la norme.

Les exigences clés peu susceptibles de changer dans un avenir prévisible sont incorporées à la norme recommandée, laquelle est reproduite intégralement à l'annexe A. Une norme d'achat plus détaillée couvrant des éléments qui peuvent changer avec les progrès technologiques est incluse à l'annexe B.

2. SPÉCIFICATIONS PHOTOMÉTRIQUES ACTUELLES POUR LES FEUX DE SIGNALISATION AUX PASSAGES À NIVEAU

Les passages à niveau présentent un problème de sécurité difficile à résoudre pour l'industrie ferroviaire : Comment partager le droit de passage avec les automobilistes? Étant donné que les trains ne peuvent s'arrêter facilement, les passages à niveau présentent un grand danger. De 40 à 50 personnes meurent chaque année aux passages à niveau au Canada, ce qui représente environ la moitié de tous les accidents mortels associés aux chemins de fer et environ 1,3 % de tous les accidents de la route (Transports Canada, 1996 et 1998). L'industrie ferroviaire a créé il y a longtemps un système d'avertissement comportant des feux pour signaler les passages à niveau afin d'avertir les conducteurs le plus tôt possible de l'approche d'un train (voir figures 1 et 2). Néanmoins, la moitié environ des accidents mortels aux passages à niveau (environ 20 par année au Canada) survient à des passages à niveau équipés de ces systèmes d'avertissement.

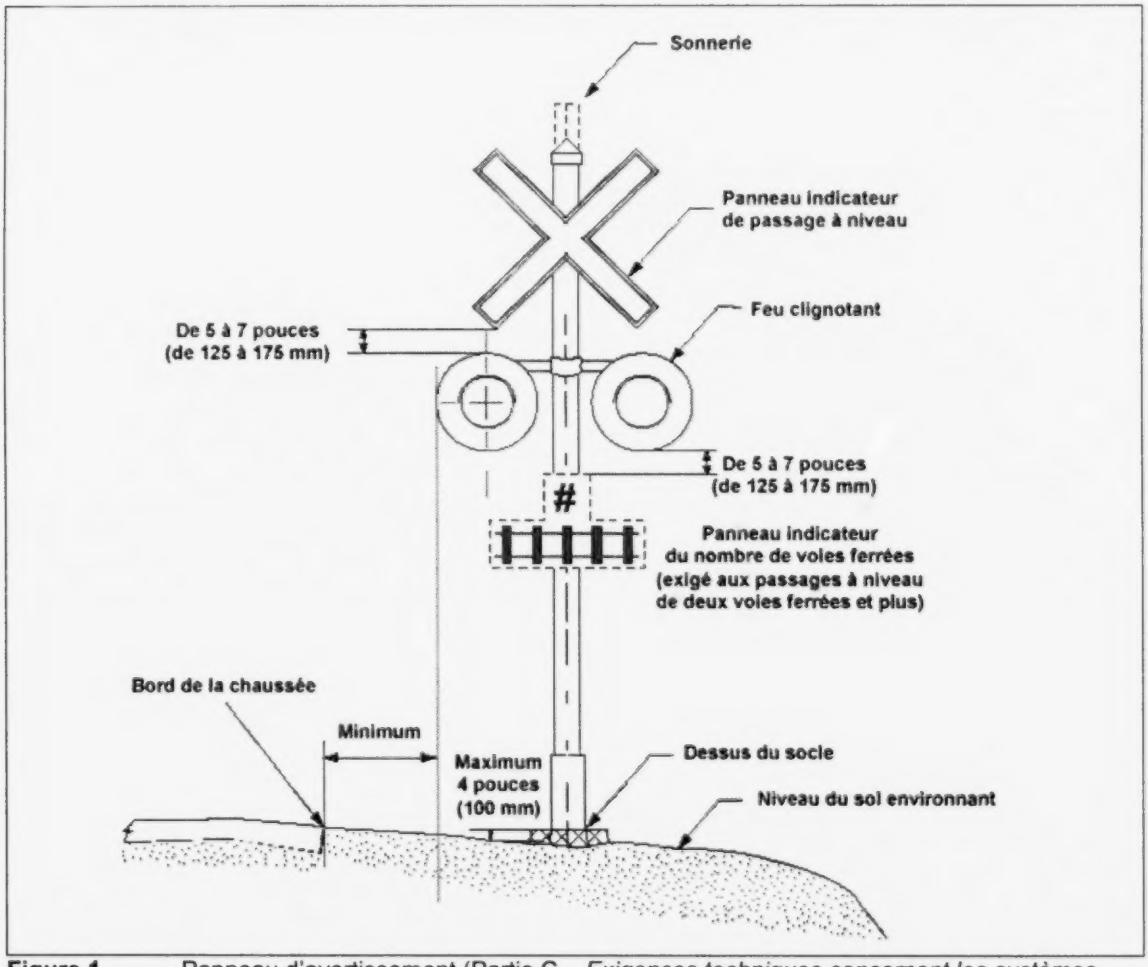


Figure 1 Panneau d'avertissement (Partie C – *Exigences techniques concernant les systèmes d'avertissement de passage à niveau*, Passages à niveau rail-route RTD 10, avant-projet, 7 mars 2002)

Afin de garantir que le système d'avertissement restera opérationnel même en cas de panne de courant, le système de signalisation ferroviaire, contrairement au système de signalisation routière, utilise des batteries de secours qui peuvent l'alimenter pendant environ 10 heures de fonctionnement continu (manuel de l'AREMA, partie 3.1.28, 1999; Codes de pratiques du CN, 2000). L'exigence que les feux puissent fonctionner sur des périodes prolongées en étant alimentés par des batteries a des incidences importantes sur la conception des feux.

La responsabilité d'établir les spécifications pour les feux de signalisation aux passages à niveau a été assumée par l'Association of American Railroads (AAR) durant de nombreuses années et a plus récemment été dévolue à l'American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA). Par le passé, Transports Canada s'est surtout basé sur ces spécifications pour réglementer la signalisation aux passages à niveau au Canada. Il y a environ 6 000 passages à niveau «actifs» au Canada qui sont dotés de feux de signalisation. Le coût d'installation et l'entretien de ces sites est assumé par les administrations routières et les chemins de fer dans le cadre d'ententes de partage des coûts, Transports Canada contribuant à certaines installations par l'intermédiaire du Programme d'amélioration des passages à niveau.

Les feux de signalisation sont conçus pour être alimentés par un groupe de batteries d'une tension nominale de 10 V. La puissance nominale des ampoules des feux de signalisation est de 18 W. Par comparaison, un feu de signalisation routière standard de 300 mm utilise une ampoule de 150 W reliée au secteur de 120 V.

Étant donné que la puissance d'une ampoule de feu de passage à niveau n'est qu'une fraction de celle d'une ampoule de feu de circulation, l'industrie ferroviaire a dû utiliser un système de signalisation différent du système de signalisation routière pour obtenir une portée suffisante. La solution a consisté à placer l'ampoule au foyer d'un miroir parabolique. Cela produit un faisceau étroit très brillant qui ressemble à celui d'un projecteur, avec une intensité lumineuse de 1 600 cd au centre du faisceau au moment de l'installation du feu de signalisation. Le faisceau est ensuite focalisé sur la route à une distance appropriée de la voie ferrée afin de donner à l'automobiliste un avertissement suffisant pour qu'il puisse s'arrêter. La distance du point visé par le feu de signalisation ferroviaire varie selon la vitesse d'approche des véhicules et peut atteindre 300 m environ.

La focalisation et l'orientation du faisceau de signalisation ferroviaire sont des opérations complexes. La focalisation et l'alignement peuvent être perturbés par la température, les vibrations, les collisions avec les mâts, les opérations de nettoyage, etc. La structure de soutien du feu doit également être très rigide, car une inclinaison de quelques degrés peut désaligner le faisceau. Cette obligation d'utiliser une structure solide compromet toutefois la sécurité d'autres façons. Le mât devient lui-même un danger et il est difficile d'installer le feu au-dessus de la circulation comme on le fait avec la circulation routière, car il faut une structure en porte-à-faux suffisamment solide pour maintenir le faisceau stable tout en supportant le poids du technicien qui doit aligner le faisceau.

Les faisceaux étroits sont bien connus des mécaniciens de locomotive : les signaux lumineux utilisés sur la voie ferrée même à l'intention du train ont un faisceau très étroit. Étant donné que tous les mécaniciens de locomotive se trouvent à la même hauteur et qu'ils doivent suivre une voie d'un mètre de largeur environ, il est facile d'orienter le faisceau. Toutefois, quand la même technologie est utilisée sur les routes, les conducteurs visés peuvent venir d'un grand nombre de directions, être assis à des hauteurs différentes, et être exposés à des distractions beaucoup plus nombreuses que ne le serait le mécanicien d'une locomotive.

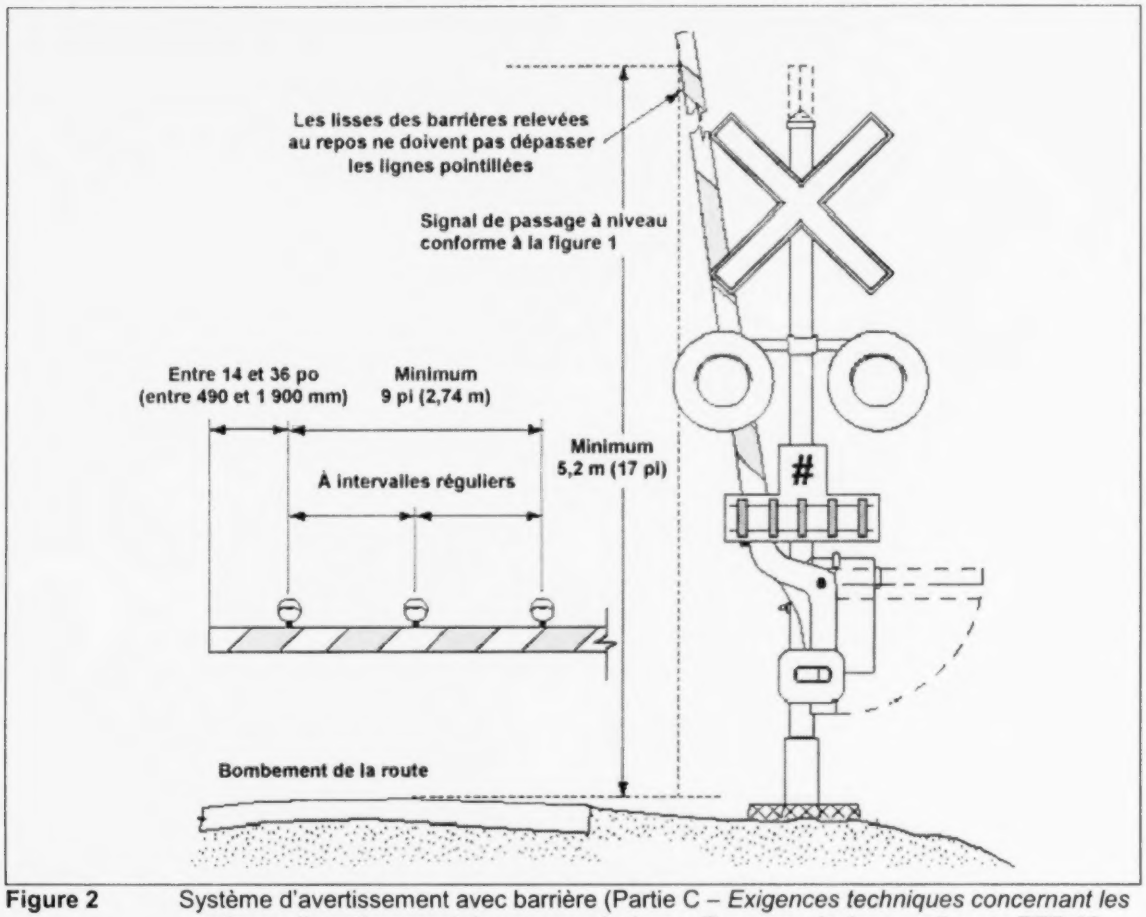


Figure 2 Système d'avertissement avec barrière (Partie C – *Exigences techniques concernant les systèmes d'avertissement de passage à niveau*, Passages à niveau rail-route RTD 10, avant-projet, 7 mars 2002)

Étant donné que le faisceau lumineux produit est étroit, on utilise généralement des lentilles pour l'élargir dans la signalisation des passages à niveau. Les diverses lentilles utilisées sont appelées des oculaires et portent des numéros qui décrivent les faisceaux produits. Bien que ces oculaires étalent le faisceau de lumière horizontalement, les faisceaux restent étroits dans le plan vertical.

La progression des normes AAR et AREMA utilisées pour réglementer la luminosité et le diagramme de rayonnement des feux de passages à niveau a été résumée par McKnight (1999). La première spécification figurant dans ce résumé date de 1966 et établissait la distance à laquelle les divers oculaires utilisés pouvaient être perçus.

En voici le texte :

1966 AAR Manual, Part 166 (spécifications pour les feux électriques de passage à niveau)

La portée doit être la distance à laquelle, par une journée ensoleillée avec le soleil au zénith ou près du zénith, le signal est clair et distinctement visible par une personne ayant une vision normale. Cette distance doit être déterminée quand le feu est utilisé avec une ampoule à incandescence d'une durée nominale de 1 000 h sous tension de 10 V.

- Avec un oculaire à étalement horizontal de 30° et à déviation verticale de 15°, la portée (en pieds) doit être la suivante (typiquement pour les feux avant de passage à niveau) :

Portée (en pieds) des feux à incandescence – Lentille 30-15

	15° G	*10° G*	*5° G*	*0°*	*5° D*	*10° D*	*15° D*
0°	500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	500
5° B				non spécifié			
10° B				n. s.			
15° B				n. s.			

- Avec un oculaire à étalement horizontal de 70° sans déviation vers le bas, la portée (en pieds) doit être (typiquement pour les feux arrière de passage à niveau) :

Portée (en pieds) des feux à incandescence – Lentille 70

	35° G	*30° G*	*25° G*	*20° G*	*15° G*	*10° G*	*5° G*	*0°*	*5° D*	*10° D*	*15° D*	*20° D*	*25° D*	*30° D*	*35° D*
0°	200	300	500	600	700	900	1 300	1 500	1 300	900	700	600	500	300	200

- Pour les feux montés en porte-à-faux et les feux montés sur des mâts à plus de 9 pieds de hauteur quand ils sont équipés d'un oculaire à étalement horizontal de 20° et à déviation verticale de 32°, la portée doit être :

Portée (en pieds) des feux à incandescence – Lentille 20-32

	15° G	*10° G*	*5° G*	*0°*	*5° D*	*10° D*	*15° D*
0°	500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	500
5° B				non spécifié			
10° B				n. s.			
15° B				n. s.			
20° B				n. s.			
25° B				n. s.			
30° B				n. s.			
35° B				n. s.			

En 1968, on a étudié l'intensité lumineuse de divers feux de signalisation qui avaient la portée requise. L'information obtenue a ensuite été utilisée pour établir les spécifications suivantes introduites en 1970 et dans lesquelles les exigences concernant la portée ont été exprimées en candelas. L'intensité lumineuse requise pour les divers oculaires était spécifiée dans le plan horizontal. Les oculaires étaient conçus pour dévier la lumière dans le plan vertical, mais aucune intensité lumineuse ni aucun diagramme de rayonnement n'étaient spécifiés dans le plan vertical.

1970 AAR Manual, Part 166 (spécifications pour les feux électriques de passage à niveau)

Les oculaires doivent être des dispositifs pour feux rouges de passage à niveau, d'un diamètre de 8 3/8 pouces, et être convexes et conformes aux spécifications de la partie 136 du manuel.

Le diagramme de rayonnement doit être établi quand le feu est équipé d'une ampoule de 18 W à filament CC6 alimenté sous tension de 10 V, conformément à l'article 88 de la partie 91 du manuel.

L'intensité minimale du faisceau (rouge) en candelas doit être conforme aux spécifications suivantes pour les divers oculaires :

Intensité lumineuse minimale (cd) des feux à incandescence – Lentille 30-15 à longue portée

	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D
0°	100	200	350	1 100	350	200	100
5° B				n. s.			
10° B				n. s.			
15° B				n. s.			

Intensité lumineuse minimale (cd) des feux à incandescence – Lentille 70 à longue portée

	30° G	25° G	20° G	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D	20° D	25° D	30° D
0°	-	25	45	75	125	500	1 600	500	125	75	45	25	--

Intensité lumineuse minimale (cd) des feux à incandescence – Lentille 20-32 à courte portée

	10° G	5° G	0°	5° D	10° D
0°	50	150	250	150	50
5° B			n. s.		
10° B			n. s.		
15° B			n. s.		
20° B			n. s.		
30° B			n. s.		

Cette norme a été reconfirmée en 1974, 1975 et 1984 d'après McKnight. Elle a été modifiée en 1991 sans explication. Le diagramme de rayonnement spécifié a été considérablement élargi et le diagramme de rayonnement vertical a été spécifié pour la première fois.

1991 AAR – Norme sur l'intensité et la distribution lumineuses pour les feux de passage à niveau à incandescence (partie 3.2.35)

(feux de 8 3/8 et 12 pouces)

Intensité lumineuse minimale (cd) des feux à incandescence – Lentille 30-15

	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D
0°	200	500	1 000	1 600	1 000	500	200
5° B				35			
10° B				25			
15° B				15			

Intensité lumineuse minimale (cd) des feux à incandescence – Lentille 70

	30° G	25° G	20° G	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D	20° D	25° D	30° D
0°	10	25	150	250	400	800	1 200	800	400	250	150	25	10

Intensité lumineuse minimale (cd) des feux à incandescence – Lentille 20-32

	10° G	5° G	0°	5° D	10° D
0°	500	1 000	1 600	1 000	500
5° B			40		
10° B			25		
15° B			15		
20° B			10		
30° B			5		

Cette norme a été reconfirmée sans changement en 1995.

En 1996, l'AAR a introduit une norme pour les feux à diodes électroluminescentes. L'intensité lumineuse requise dans l'axe a été réduite considérablement, de 1 200 cd ou 1 600 cd (selon l'oculaire) à 160 cd, pour tenir compte de la moins grande luminosité et du faisceau plus large obtenu avec DEL de l'époque. Le faisceau lumineux était circulaire et beaucoup plus étendu dans le plan vertical que le faisceau horizontal étroit produit par les feux à incandescence.

La norme était la suivante :

1996 AAR – Norme sur l'intensité et la distribution lumineuses pour les feux de passage à niveau à diodes électroluminescentes (partie 3.2.37)

- L'intensité lumineuse doit être de **160 cd au moins dans l'axe.**
- Les feux doivent pouvoir être alimentés par une source c.a. ou c.c. de 10 V ± 15 %.
- Les valeurs nominales des feux seront établies à 68 °F (20 °C).

1. L'intensité lumineuse (hors-axe) doit être distribuée comme suit :

Intensité lumineuse minimale (cd) des feux à diodes électroluminescentes

	30° G	25° G	20° G	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D	20° D	25° D	30° D
0°	3	3	5	13	51	128	160	128	51	13	5	3	3
5° B							128						
10° B							51						
15° B							13						
20° B							5						
30° B							3						

En 1999, l'AREMA a assumé la responsabilité d'établir les normes. Cet organisme a noté la différence entre les feux à incandescence et les feux à diodes électroluminescentes en ce qui concerne les exigences de luminosité dans l'axe, ainsi que le fait que les deux types de feux semblent efficaces, et a décidé de revenir à une norme de «performance» qui spécifie la portée des feux en pieds, comme l'a fait l'AAR en 1966. La norme spécifiait la distance de visibilité du feu sur l'étendue de son diagramme de rayonnement horizontal. Toutefois, la largeur du faisceau a par la suite été augmentée considérablement par rapport aux exigences de 1966, et une exigence de visibilité et un diagramme de rayonnement non harmonisé dans le plan horizontal ont été prescrits.

1999 AREMA – Norme sur l'intensité et la distribution lumineuses (partie 3.2.35) Feux à incandescence et feux à diodes électroluminescentes

Exigences de visibilité

Distance de visibilité (pieds) des lentilles 30-15 (feux avant)

	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D
0°	500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	500

Distance de visibilité (pieds) des lentilles 70 (feux arrière)

	35° G	30° G	25° G	20° G	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D	20° D	25° D	30° D	35° D
0°	200	300	500	600	700	900	1 300	1 500	1 300	900	700	600	500	300	200

Distance de visibilité (pieds) des lentilles 20-32 (feux de voie en porte-à-faux)

	10° G	5° G	0°	5° D	10° D
0°	1 000	1 500	1 500	1 500	1 000

Diagramme de rayonnement

Remarque : Il y a une anomalie entre la distance de visibilité requise et le diagramme de rayonnement. Par exemple, dans le cas de la lentille 30-15, la distance de visibilité à 10° G/D doit être égale à la distance de visibilité dans l'axe, mais le tableau décrivant le diagramme de rayonnement indique que l'intensité à 10° G/D doit être égale à 31 % de l'intensité dans l'axe.

Pourcentage de l'intensité dans l'axe – Lentille 30-15 (feux avant)

	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D
0°	13	31	63	100	63	31	13
5° B				2			
10° B				2			
15° B				1			

Pourcentage de l'intensité dans l'axe – Lentille 70 (feux arrière)

	30° G	25° G	20° G	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D	20° D	25° D	30° D
0°	1	2	13	21	33	67	100	67	33	21	13	2	1

Pourcentage de l'intensité dans l'axe – Lentille 20-32 (feux de voie en porte-à-faux)

	10° G	5° G	0°	5° D	10° D
0°	31	63	100	63	31
5° B			3		
10° B			2		
15° B			1		
20° B			1		
30° B			0,3		

La norme AREMA a également introduit le concept d'une lentille «universelle» à faisceau circulaire modélisé d'après le faisceau obtenu avec les diodes électroluminescentes sans lentille secondaire. On présume que le diagramme de rayonnement universel doit remplacer les trois diagrammes de rayonnement ci-dessus. Aucune exigence n'est spécifiée quant à la distance de visibilité du faisceau universel.

Pourcentage d'intensité dans l'axe – Lentille universelle (basée sur les déviations horizontale et verticale)

	30° G	25° G	20° G	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D	20° D	25° D	30° D
0°	2	4	13	21	33	80	100	80	33	21	13	4	2
5° B							80						
10° B							33						
15° B							21						
20° B							13						
30° B							2						

En 2002, le comité de l'AREMA a de nouveau examiné les exigences photométriques pour les feux à incandescence et les feux à DEL et a apporté les modifications suivantes.

30-15 Les exigences concernant la distance de visibilité sont changées, mais non les pourcentages d'intensité lumineuse dans la description du diagramme de rayonnement (p. ex., à une déviation horizontale de 10°, la distance de visibilité requise a été abaissée de 1 500 à 469 pi), et les spécifications visant l'intensité lumineuse dans le plan vertical sont spécifiées en pourcentage et en pieds, avec une anomalie entre les deux spécifications (à une déviation verticale de 5°, le pourcentage est de 2 % alors que la distance de visibilité est abaissée à 945 pi ou 63 % de 1 500 pi).

20-32 Les exigences concernant la distance de visibilité sont modifiées (p. ex., à une déviation horizontale de 5°, la distance de visibilité requise a été abaissée de 1 500 à 945 pi); les distances de visibilité en pieds sont les mêmes que pour la lentille 30-15, mais non les pourcentages d'intensité lumineuse.

70 La distance de visibilité dans l'axe est abaissée de 1 500 à 1 200 pi, mais il ne semble pas y avoir de lien logique entre les pourcentages d'intensité lumineuse et les distances de visibilité.

Diodes Le diagramme de rayonnement reste circulaire, mais le faisceau est beaucoup plus étroit (passant de 21 % à 8 % à 15°, de 13 % à 3 % à 20°). Le faisceau est également spécifié en pieds, la distance de visibilité en pieds s'accordant avec le pourcentage d'intensité lumineuse (mais sans relation variant selon l'inverse du carré de la distance). Les exigences concernant la distance de visibilité et le pourcentage d'intensité lumineuse ne semblent pas compatibles avec la loi de l'inverse des carrés.

Le texte intégral des exigences photométriques pour 2002 est le suivant :

2002 AREMA – Norme sur l'intensité et la distribution lumineuses (partie 3.2.35) Feux à incandescence et feux à diodes électroluminescentes

Exigences de visibilité

Distance de visibilité (pieds) des lentilles 30-15 (feux avant)

	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D
0°	188	469	938	1 500	938	469	188
5°				945			
10°				465			
15°				195			

Distance de visibilité (pieds) des lentilles 70 (feux arrière)

	35° G	30° G	25° G	20° G	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D	20° D	25° D	30° D	35° D
0°	13	13	31	188	313	500	1 000	1 200	1 000	500	313	188	31	13	13

Distance de visibilité (pieds) des lentilles 20-32 (feux de voie en porte-à-faux)

	10° G	5° G	0°	5° D	10° D
0°	469	938	1 500	938	469
5°			945		
10°			465		

Distance de visibilité (pieds) des feux à diodes électroluminescentes

	35° G	30° G	25° G	20° G	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D	20° D	25° D	30° D	35° D
0°	30	30	30	45	120	480	1 200	1 500	1 200	480	120	45	30	30	30
5°								1 200							
10°								480							
15°								120							
20°								45							
30°								30							

Diagramme de rayonnement

Pourcentage de l'intensité dans l'axe – Lentille 30-15 (feux avant)

	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D
0°	13	31	63	100	63	31	13
5° B				2			
10° B				2			
15° B				1			

Pourcentage de l'intensité dans l'axe – Lentille 70 (feux arrière)

	35° G	30° G	25° G	20° G	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D	20° D	25° D	30° D	35° D
0°	1	1	2	13	21	33	67	100	67	33	21	13	2	1	1

Pourcentage de l'intensité dans l'axe – Lentille 20-32 (feux de voie en porte-à-faux)

	10° G	5° G	0°	5° D	10° D
0°	31	63	100	63	31
5° B			3		
10° B			2		
15° B			1		
20° B			1		
30° B			0,3		

Pourcentage de l'intensité dans l'axe – Feux à diodes électroluminescentes

	35° G	30° G	25° G	20° G	15° G	10° G	5° G	0°	5° D	10° D	15° D	20° D	25° D	30° D	35° D
0°	2	2	2	3	8	33	80	100	80	33	8	3	2	2	2
5° B								80							
10° B								33							
15° B								8							
20° B								3							
30° B								2							

2.1 Justification de cette norme

Transports Canada a traditionnellement utilisé les normes de l'AAR et de l'AREMA pour les feux de passages à niveau.Toutefois, dans le cas des feux à diodes électroluminescentes, Transports Canada est préoccupé par les questions suivantes :

- la différence entre les feux à DEL et les feux à incandescence en ce qui concerne l'intensité lumineuse requise par l'AAR (160 cd dans un cas et 1 600 cd dans l'autre);
- la décision de l'AREMA de revenir à une distance de visibilité exprimée en pieds, ce qui est difficile à vérifier; et
- les changements dans les exigences concernant le diagramme de rayonnement dans la norme de l'AREMA.

La position de Transports Canada est que, au Canada, une norme mesurable, vérifiable et justifiable doit être en vigueur avant que les feux à DEL ne soient utilisés aux passages à niveau. Ce projet a pour but d'élaborer une telle norme.

3. SPÉCIFICATIONS PHOTOMÉTRIQUES ACTUELLES POUR LES FEUX DE CIRCULATION

3.1 Norme de l'Institute of Transportation Engineers (ITE)

En Amérique du Nord, l'Institute of Transportation Engineers est l'organisme de réglementation des feux de circulation routière. En ce qui concerne l'intensité lumineuse et le diagramme de rayonnement des feux de circulation à incandescence, les spécifications sont les suivantes :

ITE – Norme sur l'intensité et la distribution lumineuses pour les feux de circulation : Feux à incandescence (1998, partie 2.11.04)

Intensité lumineuse minimale (cd) – Feux à incandescence de 8 po

	Déviation horizontale à gauche (G) et à droite (D)												
	27,5° G	22,5° G	17,5° G	12,5° G	7,5° G	2,5° G	0°	2,5° D	7,5° D	12,5° D	17,5° D	22,5° D	27,5° D
0°													
2,5° B			29	67	114	157		157	114	67	29		
7,5° B	12	21	48	76	105	119		119	105	76	48	21	12
12,5° B	10	14	24	33	38	43		43	38	33	24	14	10
17,5° B	5	7	10	12	17	19		19	17	12	10	7	5

Intensité lumineuse minimale (cd) – Feux à incandescence de 12 po

	Déviation horizontale à gauche (G) et à droite (D)												
	27,5° G	22,5° G	17,5° G	12,5° G	7,5° G	2,5° G	0°	2,5° D	7,5° D	12,5° D	17,5° D	22,5° D	27,5° D
0°													
2,5° B			90	166	295	399		399	295	166	90		
7,5° B	19	45	105	171	238	266		266	238	171	105	45	19
12,5° B	19	26	40	52	57	59		59	57	52	40	26	19
17,5° B	19	24	26	26	26	26		26	26	26	26	24	19

Cette norme pour les feux de circulation à incandescence vise la performance initiale et n'exige pas que les feux de circulation restent conformes à la norme de performance une fois mis en service. Dans l'élaboration de la norme pour les feux à DEL, le comité de l'ITE a abaissé les valeurs nominales de 15 %, mais exige que les valeurs spécifiées soient conservées dans toute la gamme de températures et toute la période couverte par la garantie (Sullivan *et al.*, 1997).

ITE – Norme d'achat relativement à l'intensité et à la distribution lumineuses pour les feux de circulation : Feux à diodes électroluminescentes (1998, partie 2a.4.1) (à la fin de la période de garantie de 3 ans et à 74 °C)

Exigences minimales

Feux de circulation de 8 po à diodes électroluminescentes (cd)

	Déviation horizontale à gauche (G) et à droite (D)												
	27,5° G	22,5° G	17,5° G	12,5° G	7,5° G	2,5° G	0°	2,5° D	7,5° D	12,5° D	17,5° D	22,5° D	27,5° D
0°													
2,5° B			25	57	97	133		133	97	57	25		
7,5° B	10	18	41	65	89	101		101	89	65	41	18	10
12,5° B	9	12	20	28	32	37		37	32	28	20	12	9
17,5° B	4	6	9	10	14	16		16	14	10	9	6	4

Feux de circulation de 12 po à diodes électroluminescentes (cd)

	Déviation horizontale à gauche (G) et à droite (D)												
	27,5° G	22,5° G	17,5° G	12,5° G	7,5° G	2,5° G	0°	2,5° D	7,5° D	12,5° D	17,5° D	22,5° D	27,5° D
0°													
2,5° B			77	141	251	339		339	251	141	77		
7,5° B	16	38	89	145	202	226		226	202	145	89	38	16
12,5° B	16	22	34	44	48	50		50	48	44	34	22	16
17,5° B	16	20	22	22	22	22		22	22	22	22	20	16

Le texte de la norme visant l'obligation de maintenir cette intensité lumineuse durant la période de garantie se lit comme suit : «Les intensités lumineuses minimales conservées par les modules de signalisation routière a diodes électroluminescentes durant leur période de garantie, dans les conditions d'utilisation exposée aux sections 3.3 (de -40 °C à 74 C) et 5.2.1 (pour une gamme de tensions allant de 80 à 135 V), et à la fin de la période de garantie, ne doivent pas être inférieures aux valeurs indiquées…»

La norme spécifie également que l'intensité lumineuse des feux à DEL ne doit pas dépasser 800 cd.

Bullough *et al.* (1999) ont étudié les effets de la réduction de 15 % de la luminosité exigée, ainsi que l'effet de la couleur de la lumière émise par les DEL. Après une comparaison des feux à incandescence utilisés à l'intensité lumineuse de 399 cd requise par l'ITE et des feux à DEL utilisés à l'intensité lumineuse requise de 339 cd, ils concluent :

- que la différence entre les temps de réaction moyens des conducteurs n'est pas statistiquement significative; et
- qu'il n'y a pas de différences statistiquement significatives en ce qui concerne les signaux non aperçus, la reconnaissance de la couleur, ou la luminosité et la perceptibilité des feux.

Tableau 1 – Changements prévus dans le temps de réaction moyen, les signaux non aperçus, l'intensité lumineuse nominale et la perceptibilité nominale résultant de la réduction de 15 % de la luminosité des DEL dans les spécifications de l'ITE (tableau partiel)

Grandeur mesurée	DEL rouges
Pourcentage de changement du temps de réaction	+ 2,4 %
Pourcentage de changement dans les signaux non aperçus	de 0,7 à 0,8 %
Changement d'intensité lumineuse nominale (1 = très faible, 10 = très grande)	de 6,34 à 6,03
Changement de perceptibilité nominale (1 = invisible, 10 = très perceptible)	de 6,66 à 6,32

Les spécifications de l'ITE pour les feux à incandescence et les feux à DEL ont tout récemment été examinées par le National Co-operative Highway Research Project, le Transportation Research Board et le National Research Council Project 5-15 : Visibility Performance Requirements for Vehicular Traffic Signals. Ce rapport se termine en recommandant que les normes pour les applications aux routes à circulation rapide soient augmentées au niveau suggéré par Hulscher (1975), c'est-à-dire à 600 cd avec des panneaux. C'est la norme utilisée par l'Australie (voir section 3.3). L'ITE conteste la méthodologie et les conclusions de ce rapport, et il est peu probable que la norme ITE soit modifiée à court terme (Cheeks, 2002).

3.2 Norme européenne

3.2.1 Équipement de régulation du trafic – Têtes de feu (EN 12368:2000)

L'intensité des feux de signalisation à oculaires de 200 et 300 mm en Europe est spécifiée au tableau 2. Celui-ci indique également l'intensité lumineuse maximale.

Tableau 2 – Intensités lumineuses (I) des feux de signalisation rouge, jaune et vert dans l'axe de référence

Niveau de performance	1	2	3
I_{min}	100 cd	200 cd	400 cd
I_{max} *classe 1*	400 cd	800 cd	1 000 cd
I_{max} *classe 2*	1 100 cd	2 000 cd	2 500 cd

La norme spécifie quatre distributions angulaires d'intensités lumineuses pour les feux de signalisation. On peut choisir un faisceau extralarge, large, moyen ou étroit pour obtenir une bonne reconnaissance du signal sur de courtes distances dans les zones urbaines, et sur de grandes distances dans les zones rurales. Ces distributions angulaires sont spécifiées sous la forme d'intensités lumineuses minimales et sont exprimées en pourcentages. Le tableau 3 décrit le faisceau large; nous l'utilisons dans notre comparaison car ce diagramme de rayonnement est le diagramme universel et est applicable à toutes les intensités du tableau 2.

Tableau 3 – Faisceau large (type W)

Déviation horizontale à gauche (G) et à droite (D)													
	30° G	20° G	15° G	10° G	5° G	2,5° G	0°	2,5° D	5° D	10° D	15° D	20° D	30° D
0°	1	3	-	55	85	-	100	-	85	55	-	3	1
1,5° B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3° B	-	-	-	-	75	-	80	-	75	-	-	-	-
5° B	-	-	-	35	-	-	60	-	-	35	-	-	-
10° B	-	8	-	-	-	-	30	-	-	-	-	8	-
20° B	2	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	2

– : aucune valeur spécifiée

Cette norme spécifie les valeurs initiales avec une dégradation maximale permise de 20 %. Le texte est le suivant :

«La performance optique des unités lumineuses (têtes de feu) utilisées est fonction de la salissure de la lentille, de la salissure du miroir et de la baisse du flux lumineux de la lampe. Pour maintenir la performance des unités lumineuses durant la période de service, il est important de vérifier qu'après le remplacement de la lampe et le nettoyage de la lentille et du miroir, l'intensité lumineuse est revenue aussi près que possible de 100 % et n'est jamais inférieure à 80 % de la performance spécifiée certifiée».

3.3 Norme australienne

3.3.1 Feux de circulation (AS 2144 – 1995)

L'Australie a été à l'avant-garde d'une grande partie de la recherche sur les exigences photométriques concernant les feux de circulation et a établi ses propres normes. La norme australienne sur les feux de circulation pour voies rapides est de 600 cd, avec des faisceaux plus étroits que ceux utilisés en Amérique du Nord. La norme exige que l'intensité lumineuse ne soit pas inférieure aux valeurs du tableau 4.

Tableau 4 – Distribution des intensités lumineuses des feux à grande portée

Déviation horizontale à gauche (G) et à droite (D)															
	25° G	20° G	15° G	10° G	7,5° G	5° G	2,5° G	0°	2,5° D	5° D	7,5° D	10° D	15° D	20° D	25° D
0°	-	-	-	100	-	200	600	600	600	200	-	100	-	-	-
1,5° B	-	-	-	-	-	-	-	600	-	-	-	-	-	-	-
3° B	-	-	-	-	100	-	-	200	-	-	100	-	-	-	-
5° B	-	15	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	15	-
7,5° B	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	-
10° B	-	-	-	-	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-
15° B	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15
20° B	--	-	-	-	-	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-

La norme australienne vise «les feux neufs propres». Elle stipule que les valeurs spécifiées comportent «une tolérance nominale pour la baisse d'intensité lumineuse entre les opérations d'entretien périodique. Cette baisse d'intensité est le résultat du vieillissement du feu et de la salissure de ses surfaces optiques dans des conditions de fonctionnement normales».

3.4 Comparaison de diverses normes sur les feux de circulation

La figure 3 représente une comparaison approximative de l'intensité lumineuse dans l'axe de la norme nord-américaine ITE, de la norme européenne et de la norme australienne. La comparaison est approximative parce que la norme ITE ne spécifie pas les intensités dans l'axe : l'intensité ne commence à être spécifiée qu'à 2,5 degrés sous l'horizontale. On doit se rappeler que la norme ITE décrit une performance «conservée», que la norme européenne autorise une baisse de 20 % en cours d'utilisation, et que la norme australienne autorise une baisse «nominale» de l'intensité lumineuse après l'installation des feux.

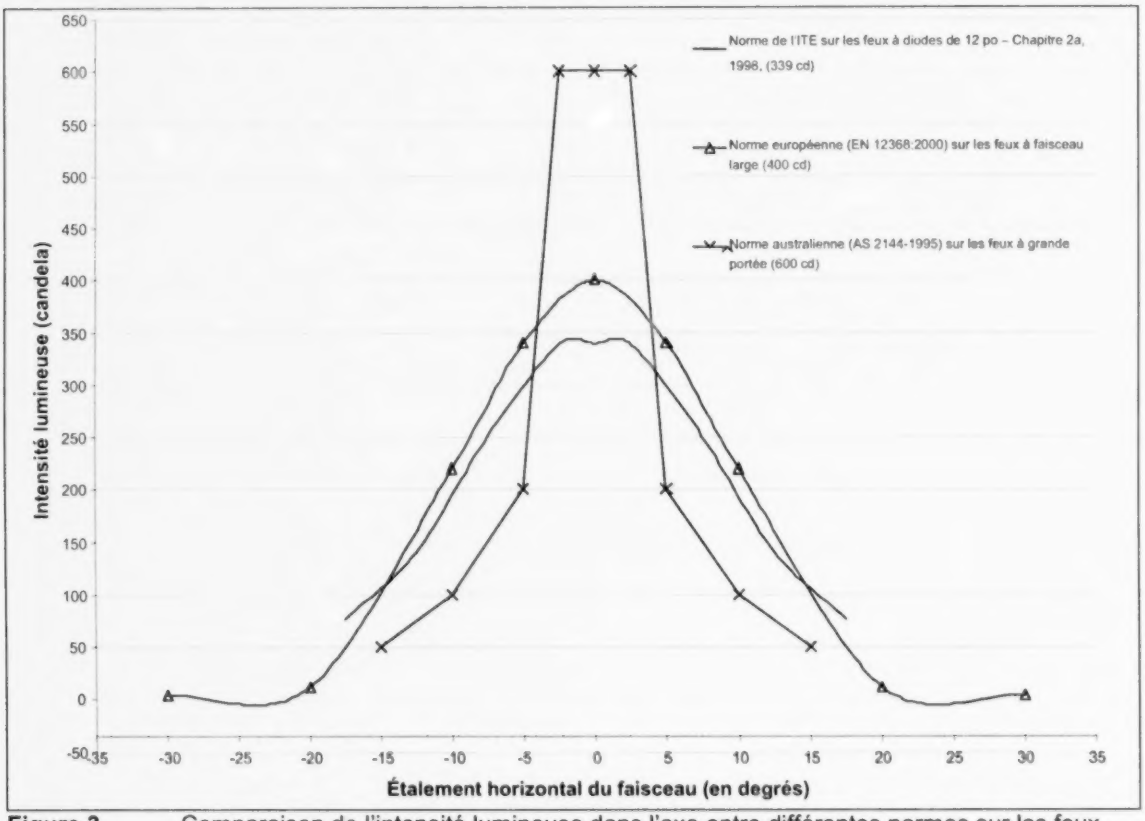


Figure 3 Comparaison de l'intensité lumineuse dans l'axe entre différentes normes sur les feux de circulation (dans la norme ITE, l'intensité n'est spécifiée qu'aux angles ≤ -2,5°)

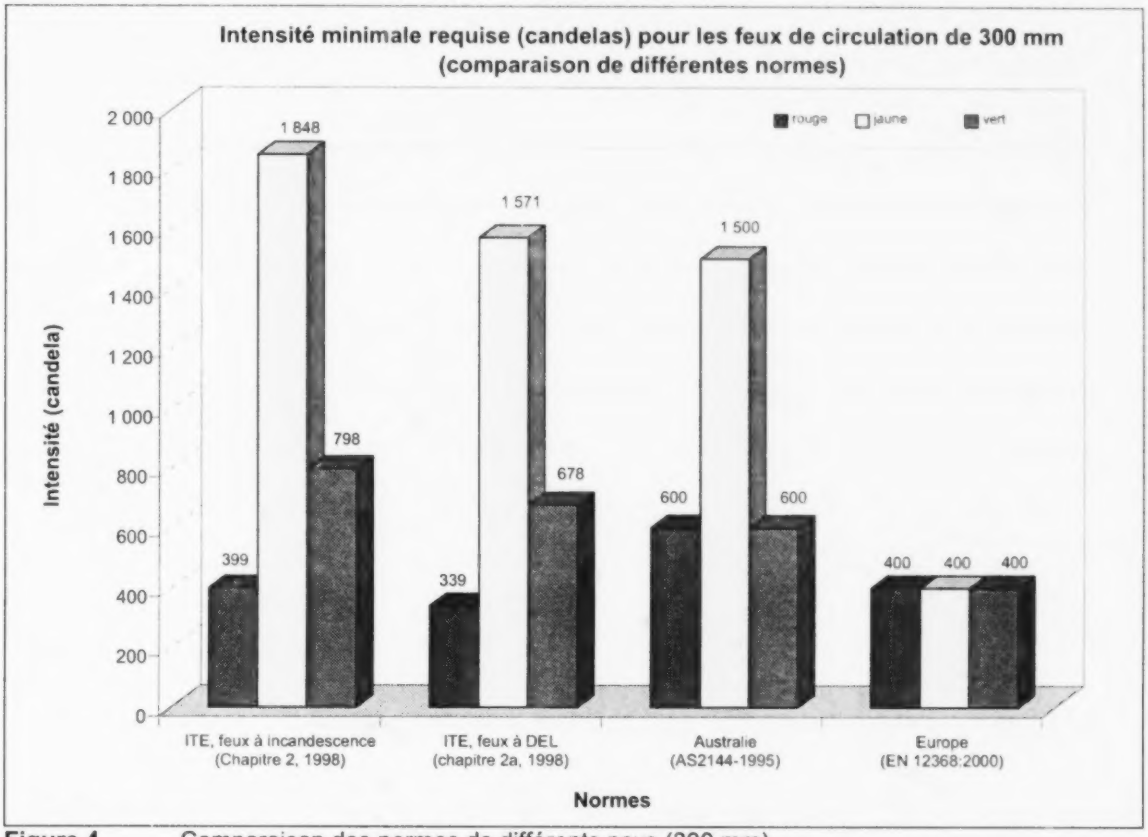


Figure 4 Comparaison des normes de différents pays (300 mm)

3.5 Conclusions quant à la situation actuelle des normes

Les normes sur les feux de circulation rouges des routes à circulation rapide ne sont pas très différentes d'un pays à l'autre, particulièrement en ce qui concerne le diagramme de rayonnement et le libellé des spécifications d'entretien. En Amérique du Nord, la norme de l'ITE sur les feux de circulation à DEL rouges a été acceptée par tous les États et toutes les provinces et les feux à DEL sont rapidement adoptés sur tout le continent (Balthazar,2001).

4. SITUATION DE LA TECHNOLOGIE DEL

L'un des problèmes dans l'établissement d'une norme sur les modules de signalisation à DEL est le rythme des améliorations technologiques dans ce domaine. Il y a 10 ans, les DEL n'étaient utilisées que sous la forme de voyants montés sur des cartes de circuits, des tableaux de bord, etc. La technologie de production de faisceaux lumineux au moyen de DEL a progressé considérablement depuis. On peut maintenant fabriquer des DEL de pratiquement toutes les couleurs et la luminosité a augmenté si considérablement que l'on est près du niveau dangereux en cas de vision dans l'axe.

Les meilleures DEL rouges fabriquées en laboratoire en 1970 avaient une efficacité lumineuse de 1 Lm/W. Cette efficacité a augmenté exponentiellement et les meilleures DEL rouges produites en laboratoire ont maintenant une efficacité voisine de 45 Lm/W (Craford *et al.*, 2001). Dans le commerce, on trouve couramment des DEL rouges d'une efficacité de 20 Lm/W.

Les ampoules à incandescence produisent une lumière blanche avec une efficacité lumineuse de 15-20 lumens par watt d'électricité consommée. Avec l'addition d'un filtre rouge, environ les deux tiers de la lumière sont filtrés. Comme résultat, les DEL rouges sont au moins trois fois plus efficaces que les ampoules à incandescence pour produire de la lumière rouge avec de l'électricité. De plus, la lumière rouge produite est «plus pure» et plus pénétrante.

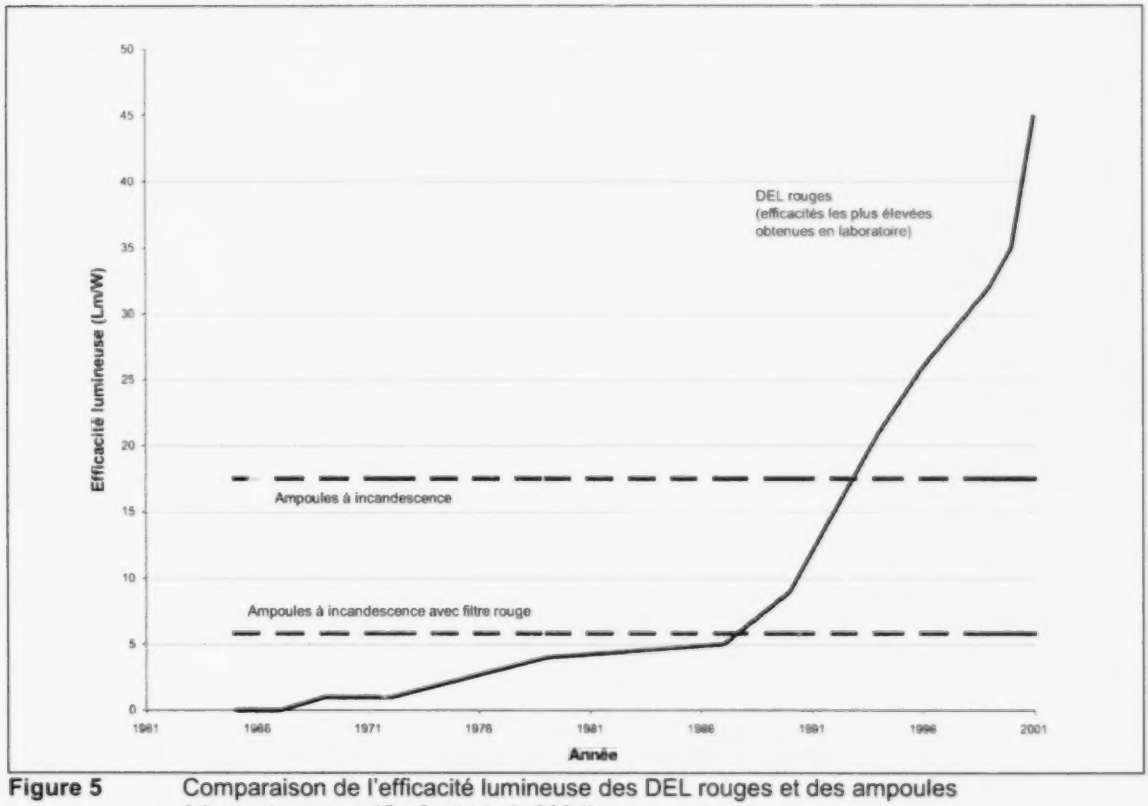


Figure 5 Comparaison de l'efficacité lumineuse des DEL rouges et des ampoules à incandescence (Craford *et al.*, 2001)

En plus d'être efficaces comme sources lumineuses, les DEL sont également beaucoup plus durables que les ampoules à incandescence et sont insensibles aux vibrations et aux chocs. La figure 6 illustre la construction d'une DEL à semi-conducteur encapsulée. Le tableau 5 montre la moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF) des DEL. La MTBF dépasse un million d'heures même en supposant que les DEL sont exposées en permanence à la température ambiante prévue la plus élevée (75 °C). Typiquement, la MTBF des ampoules à incandescence varie de 1 000 à 5 000 heures, de sorte que les DEL leur sont incomparablement supérieures en ce qui concerne leur durée de vie prévue.

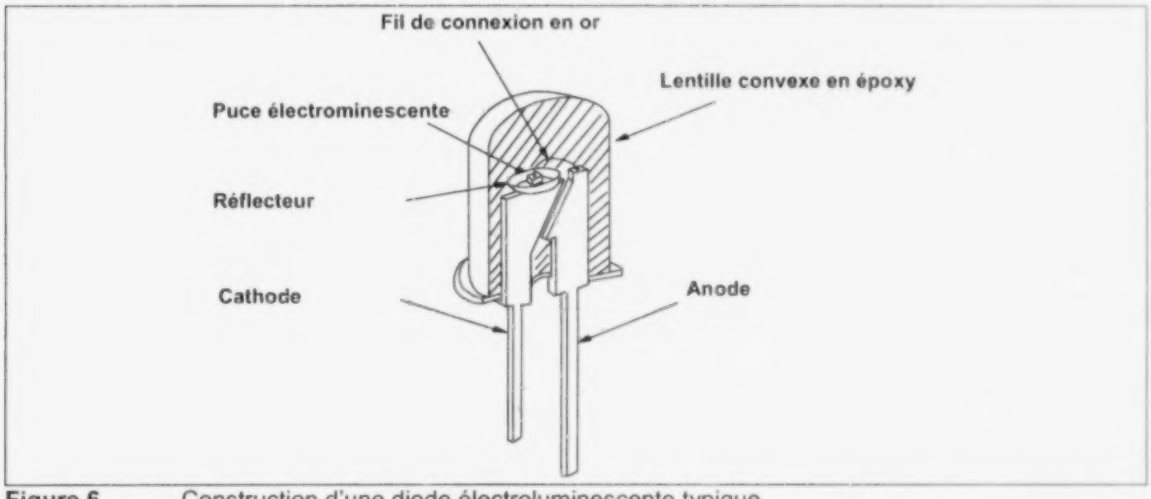


Figure 6 Construction d'une diode électroluminescente typique

Tableau 5 – MTBF et taux de défaillance de DEL à technologie AlInGaP sous boîtier T-1 ¾ (Agilent Application Brief I-004)

Température de fonctionnement ambiante [C (F)]	Température de la puce électroluminescente [C (F)]	Moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF) [heures]	Taux de défaillance λ [%/1 000 heures]
85 (185)	103 (217)	848 000	0,188
75 (167)	93 (199)	1 220 000	0,082
65 (149)	83 (181)	1 791 000	0,056
55 (131)	73 (163)	2 688 000	0,037
45 (113)	63 (145)	4 133 000	0,024
35 (95)	53 (127)	6 525 000	0,015
25 (77)	43 (109)	10 701 000	0,009
15 (59)	33 (91)	17 978 000	0,006
5 (41)	23 (73)	30 922 000	0,003

Étant donné que les DEL sont si durables, leur dégradation avec le temps est une question qu'il faut examiner. L'intensité lumineuse des DEL décroît avec l'usage, mais le taux de dégradation est extrêmement faible. Le graphe logarithmique de la figure 7 montre le taux de décroissance prévu. Ce graphe ne contient aucune donnée réelle après 20 000 heures d'usage car les DEL à technologie AlInGaP n'existent pas depuis beaucoup plus longtemps.

Le taux de dégradation dépend de l'intensité du courant d'alimentation des DEL (voir figure 8). Avec les DEL actuelles, l'intensité du courant d'alimentation continu ne doit pas dépasser 30 mA. À un passage à niveau, un module de signalisation à DEL est utilisé environ 300 heures par année en moyenne. Une période de 10 000 heures d'usage correspondrait approximativement à une durée de vie de 15 ans pour un feu à DEL, ce qui est plus que la durée de vie prévue du boîtier, des joints d'étanchéité et des autres éléments du système d'avertissement. La baisse d'intensité lumineuse d'une DEL après 10 000 heures d'usage avec un courant d'alimentation de 30 mA entraînerait une baisse maximale de 20 % de l'intensité lumineuse avec le temps.

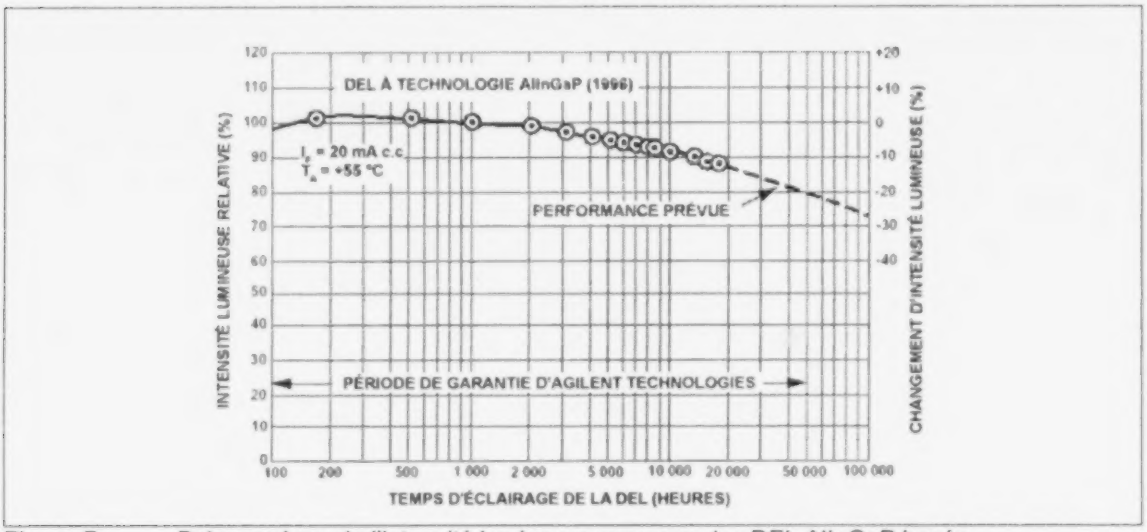


Figure 7 Baisse prévue de l'intensité lumineuse moyenne des DEL AlInGaP basée sur les données obtenues dans une période d'utilisation à haute température de 16 000 heures (Agilent Technologies, Application Brief I-018, 1999)

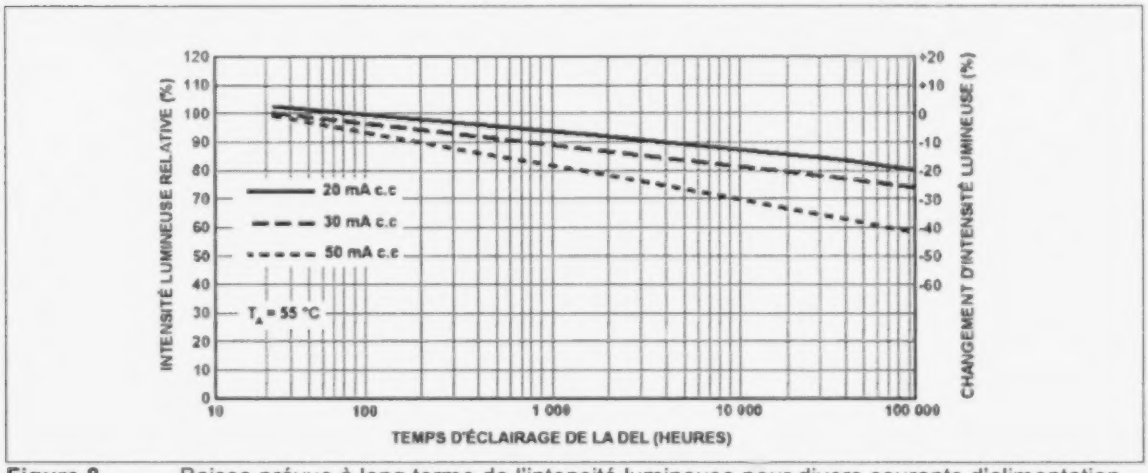


Figure 8 Baisse prévue à long terme de l'intensité lumineuse pour divers courants d'alimentation continus (Agilent Technologies, Application Brief I-024, 1999)

Dans l'examen des questions concernant l'utilisation des DEL comme sources lumineuses dans un système de signalisation routière ou ferroviaire, il est important de se rappeler que la fiabilité

de l'ensemble du système est le facteur important. De nombreuses DEL doivent être soudées ensemble pour constituer un réseau qui doit être relié à un circuit d'alimentation. Celui-ci est le maillon le plus faible du système (voir figure 9). Quand une durée de vie extrêmement longue et une grande fiabilité sont essentielles, il est prudent d'utiliser des circuits d'alimentation redondants pour qu'un autre circuit prenne la relève en cas de défaillance du circuit d'alimentation.

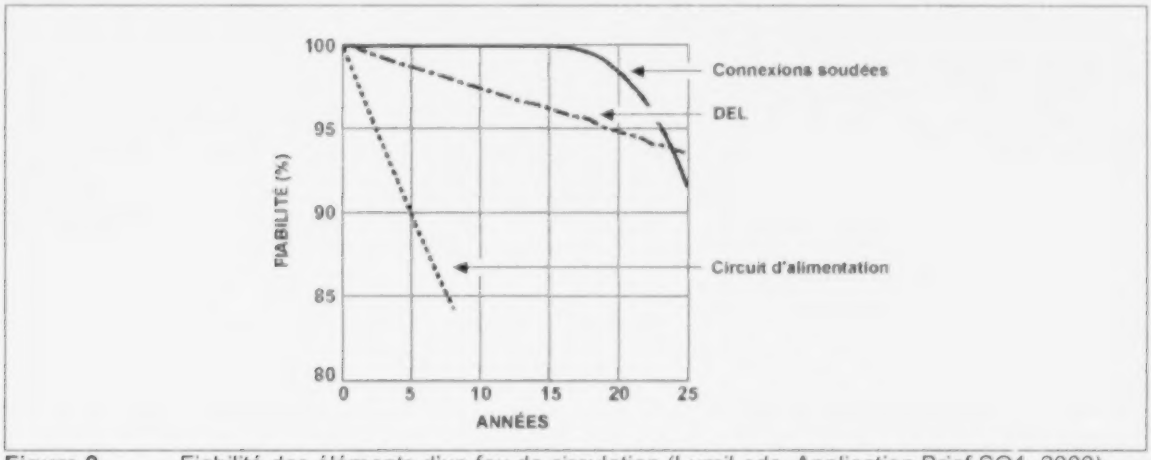


Figure 9 Fiabilité des éléments d'un feu de circulation (LumiLeds, Application Brief SO1, 2000)

Il existe un dernier point important à examiner avant d'utiliser les DEL dans les feux de signalisation : leur performance en fonction de la température. Alors que les ampoules à incandescence ont à peu près la même intensité lumineuse sur une vaste gamme de températures, les DEL actuelles sont moins efficaces aux températures élevées. La baisse de l'intensité lumineuse en fonction de l'accroissement de la température est importante, puisqu'elle est presque de 1 % pour chaque degré de température au-dessus 20 °C (figure 10). Il faut que les spécifications concernant les feux à DEL garantissent que l'intensité lumineuse sera maintenue sur la gamme de températures à laquelle les feux sont susceptibles d'être exposés en cours d'opération.

Les ampoules à incandescence n'ont pas des durées de vie particulièrement longues et leur intensité lumineuse varie peu en fonction de la température. Les DEL ont une très longue durée de vie et posent des problèmes importants en ce qui concerne la température. C'est pourquoi il est important de spécifier les exigences à la fin de la vie utile et la performance en fonction de la température pour les modules de signalisation à DEL. Les remarques ci-dessous aident à déterminer les dispositions qui peuvent atténuer les conséquences de la dégradation de la performance avec le temps et la température.

- Les expériences devraient être basés sur les exigences d'intensité lumineuse minimale de la spécification d'achat de l'ITE, avec une majoration de 40 % pour tenir compte de la dégradation normale des DEL actuelles (c.-à-d. des DEL ayant une intensité lumineuse de 500 cd environ) (CN Alignement Criteria – Test Report, 1997).
- Un facteur qui réduit l'intensité : un changement de température de 1 °C entraîne un changement d'intensité de 1 % environ (une réduction d'environ 30 à 40 % à 74 °C) (Durgin, 1998).

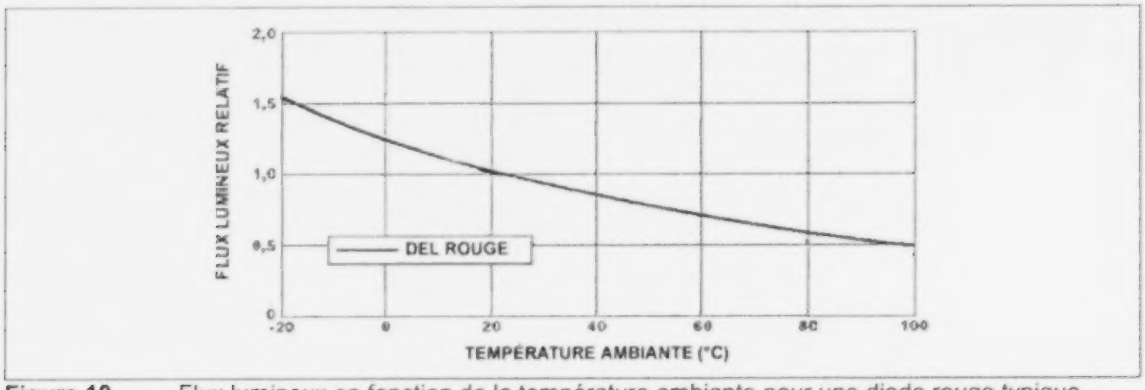


Figure 10 Flux lumineux en fonction de la température ambiante pour une diode rouge typique AlInGaP alimentée avec un courant constant (LumiLeds, Application Note 1149-4, 2000)

4.1 Avantages des DEL eut égard à l'intensité lumineuse

Les feux de passage à niveau fonctionnent depuis toujours au moyen d'ampoules à incandescence de 18 W alimentées sous tension nominale de 10 V. Basée sur des données d'efficacité lumineuse, la comparaison suivante montre l'avantage de remplacer les ampoules à incandescence par des DEL comme sources lumineuses :

Comparaison du flux de lumière rouge des ampoules à incandescence et des DEL

Ampoules à incandescence :

- Efficacité lumineuse moyenne typique de 15-20 Lm/W.
- Supposons que l'efficacité moyenne soit de 17,5 Lm/W.
- Le filtre rouge réduit cette efficacité d'un facteur trois environ et l'abaisse à 5,8 Lm/W.
- Supposons qu'on utilise une ampoule de 18 W.
- Celle-ci produit un flux lumineux de 5,8 x 18 = 104 Lm en consommant un courant de 1,8 A sous tension de 10 V.

DEL rouges

Les DEL disponibles dans le commerce en 2000 (la dernière année pour laquelle ces données sont disponibles) avaient typiquement une efficacité lumineuse de 15-20 Lm/W (Agilent Technologies, 2000) (*cette efficacité est constamment améliorée).*

- Supposons que l'efficacité moyenne était de 20 Lm/W en 2001.
- Les DEL n'ont pas de filtre, mais elles nécessitent une alimentation dont la perte de rendement peut atteindre 15 % environ.
- Supposons que l'efficacité lumineuse est de 17 Lm/W compte tenu des pertes.
- Supposons que les modules de signalisation à DEL affichent la même consommation d'énergie que les ampoules à incandescence : 1,8 A x 10 V = 18 W.
- Cette consommation d'énergie produira un flux lumineux de 18 x 17 = 306 Lm, c'est-à-dire environ trois fois celui d'une ampoule à incandescence, avec le même courant.

Conclusion

Les DEL peuvent produire une lumière rouge avec une efficacité qui correspond environ au triple de celle des ampoules à incandescence.

4.2 Diagrammes de rayonnement des feux à DEL

Les ampoules à incandescence ont été utilisées pendant plus d'un siècle et il existe des lentilles pouvant créer à peu près n'importe quel diagramme de rayonnement imaginable. Malheureusement, il est fréquent qu'on n'obtienne pas de bons résultats en montant un module de signalisation à DEL (un réseau de diodes) derrière une lentille conçue pour les ampoules à incandescence. Le réseau de DEL comporte plusieurs sources lumineuses alors qu'une ampoule à incandescence n'a qu'un seul filament placé à son centre. Ainsi, il n'est pas pratique de monter un réseau de DEL au foyer d'un miroir parabolique, et une seule DEL ne produirait pas suffisamment de lumière.

Chaque DEL individuelle est encapsulée dans une époxy qui sert de lentille pour focaliser la lumière produite. Le faisceau de lumière est conique, avec un angle d'ouverture typique allant de 7 à 30°. Un réseau de DEL alignées dans la même direction produit le même cône de lumière qu'une DEL unique, mais avec une plus grande intensité.

Pour obtenir des faisceaux différents de ce faisceau conique, il faut utiliser une lentille. Celle-ci est souvent appelée lentille secondaire. Pour obtenir un diagramme de rayonnement donné avec un groupe de DEL, il faut monter une lentille devant chacune des DEL. Étant donné que celles-ci exigent une construction optique particulière et un nouveau moule d'injection en plus d'occasionner des frais de lancement, on comprend qu'il peut y avoir une certaine réticence à fabriquer de nouvelles lentilles pour chaque réseau de diodes. L'utilisation de lentilles secondaires augmente également la complexité et le coût du produit final.

Étant donné que les lentilles pour ampoules à incandescence ne peuvent être utilisées avec les réseaux de DEL, il faut réexaminer les exigences concernant le diagramme de rayonnement des feux de passages à niveau en vue de les optimiser pour l'objectif visé. Les diagrammes de rayonnement doivent également être aussi universels que possible afin que les économies d'échelle incitent les fabricants à produire les lentilles nécessaires.

Il n'est pas conseillé d'exiger simplement que le faisceau de rayonnement soit identique à celui des ampoules à incandescence traditionnelles. Les diagrammes de rayonnement des ampoules à incandescence n'étaient pas parfaitement adaptés aux besoins des conducteurs. Ils représentaient plutôt ce qu'on pouvait obtenir avec la technologie du moment. Leur étroitesse dans le plan vertical exige une focalisation et un alignement de précision. Maintenant qu'une nouvelle technologie permet d'utiliser des faisceaux plus larges, la sécurité des conducteurs devrait être le facteur déterminant dans le choix du diagramme de rayonnement.

4.3 Utilisation des DEL dans les feux de circulation

Dans le domaine de la signalisation routière, des centaines de milliers de modules de signalisation à DEL rouges sont présentement utilisés. L'adoption de cette technologie se répand très rapidement à cause des économies d'énergie et de la réduction des coûts d'entretien qu'elle permet.

Il y a plusieurs fabricants sur le marché nord-américain. Les stratégies de conception varient considérablement de l'un à l'autre, avec de grandes différences dans le nombre de DEL utilisé, la disposition des lentilles, les caractéristiques d'alimentation et la structure physique des modules. La figure 11 illustre diverses dispositions de DEL et la figure 12 montre comment les DEL sont montées derrière une lentille secondaire dans un module (la lentille primaire étant la

DEL elle-même). Tous les feux de circulation utilisent des lentilles secondaires pour modifier le diagramme de rayonnement des DEL afin de se conformer à la norme ITE sur les feux de circulation.

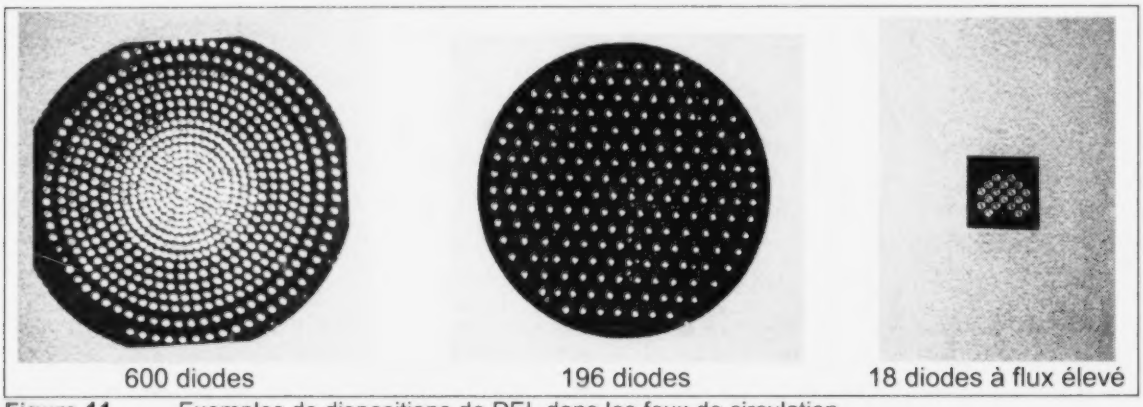


Figure 11 Exemples de dispositions de DEL dans les feux de circulation

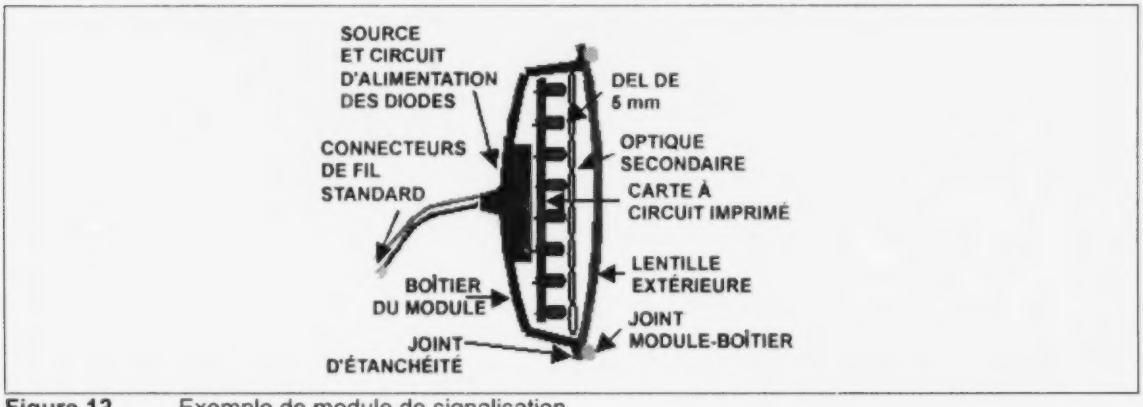


Figure 12 Exemple de module de signalisation

Les économies d'énergie et d'entretien sont si grandes pour la signalisation routière que les feux de circulation à DEL rouges vont vraisemblablement être adoptés universellement au cours de la prochaine décennie. Plusieurs autorités offrent des incitatifs et des subventions aux municipalités afin d'encourager l'adoption de cette technologie (Quesnel, 2002).

4.4 Résultats de l'utilisation de modules à DEL aux passages à niveau

L'utilisation des DEL de signalisation aux passages à niveau s'est répandue beaucoup plus lentement que pour les feux de circulation. Les principales différences entre les deux marchés sont les suivantes :

- les économies d'énergie sont moins attrayantes car les feux de passages à niveau ont un faible coefficient d'utilisation;
- le marché est beaucoup plus petit et plus spécialisé;

- les alimentations requises sont plus compliquées, car elles doivent pouvoir fournir un courant alternatif et un courant continu à basse tension;
- il y a une grande incertitude quant à la norme que les modules de signalisation devront observer.

À l'heure actuelle, il y a environ 20 000 feux de passages à niveau à DEL aux États-Unis. Manifestement, cela constitue une expérience majeure dans l'utilisation de ces types de feux et leur utilisation quotidienne est une source de données qui ne peut être ignorée dans l'établissement de la norme canadienne.

La plupart des modules à DEL utilisés aux États-Unis ont été conçus pour être conformes à la spécification de 160 cd de la norme originelle de l'AAR. De nombreux modules en usage n'ont pas de lentille secondaire et produisent un cône de lumière circulaire aussi large dans le plan vertical que dans le plan horizontal.

L'utilisation sur le terrain de ces modules à DEL montre qu'ils produisent un faisceau suffisamment «universel» pour l'un ou l'autre de leurs trois principaux usages (signalisations avant et arrière et démarcation des voies). Ils ne nécessitent pas de focalisation, de sorte que l'alignement est simple. Leur entretien est fortement réduit parce qu'ils sont plus durables (Sharkey, 2001-2002).

5. FACTEURS HUMAINS

L'entrée des DEL dans des applications clés d'éclairage de sécurité a soulevé des craintes à cause de différences possibles dans la perception oculaire de la lumière plus monochromatique émise par ces dispositifs. Les DEL rouges couvrent une gamme de longueurs d'onde plus étroite qu'une ampoule à incandescence filtrée. La technologie actuelle de construction des diodes (AlInGaP) produit de la lumière rouge dans la gamme de 640 ± 20 nm. Les ampoules à incandescence produisent une lumière blanche qui couvre toutes les fréquences; cette lumière est filtrée par une lentille rouge qui élimine les longueurs d'onde correspondant aux fréquences élevées. La lentille conserve tout le spectre rouge et les grandes longueurs d'onde allant jusqu'à 700 nm (la limite de réponse de l'œil humain) ainsi qu'une partie de l'infrarouge.

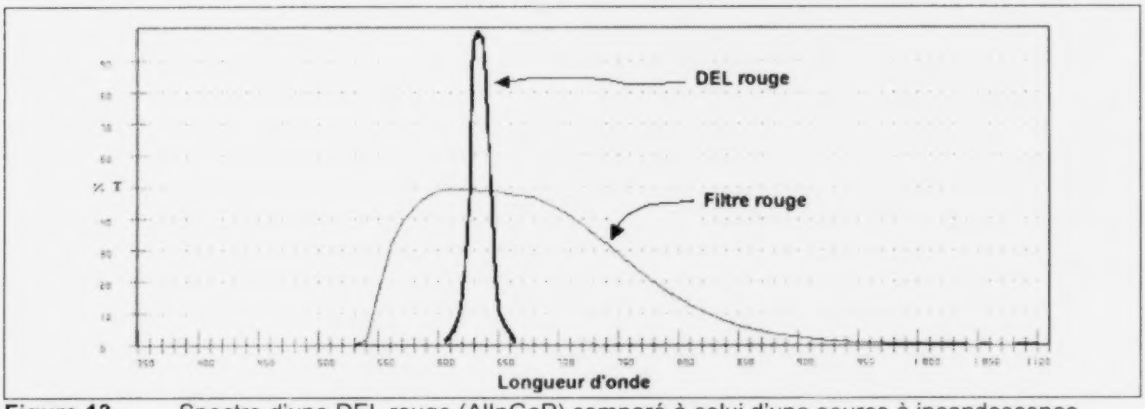


Figure 13 Spectre d'une DEL rouge (AlInGaP) comparé à celui d'une source à incandescence avec un filtre rouge

Les sections suivantes examinent les divers facteurs humains qui peuvent influer sur la perceptibilité des feux à DEL et être importants dans l'établissement de la norme de performance de ces types de feux.

5.1 Daltonisme

Les conducteurs daltoniens sont une préoccupation évidente quand il y a un changement dans les caractéristiques lumineuses des feux d'avertissement. Chez les daltoniens, le problème de loin le plus courant est la difficulté de distinguer le rouge du vert, ce qui se retrouve dans environ 8 % des hommes 0,4 % des femmes (Eklund, 1999). Il s'agit de savoir si les feux à diodes rouges sont moins perceptibles que les feux à incandescence pour les daltoniens.

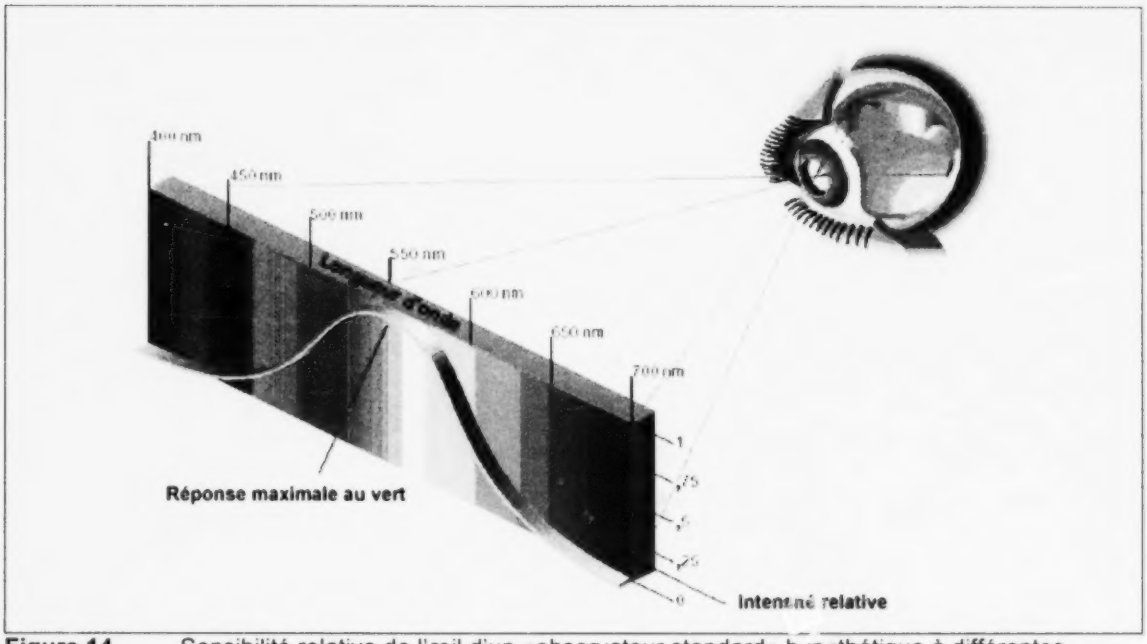


Figure 14 Sensibilité relative de l'œil d'un «observateur standard» hypothétique à différentes longueurs d'onde pour des niveaux d'éclairage normaux (courbe photopique de la CIE) [Silicon Graphics Computer Systems : http://www.sgi.com/products/legacy/displays.html]

Les termes utilisés pour décrire les individus en ce qui concerne la perception des couleurs sont :

- les trichromates, qui peuvent percevoir les trois couleurs primaires;
- les dichromates, qui ne peuvent percevoir que deux des couleurs primaires;
- les monochromates, qui ne peuvent percevoir que le noir et le blanc.

Les conditions de daltonisme suffisamment courantes pour être importantes et qui sont liées à la perception des feux rouges sont un type d'anomalie trichromatique (la protanomalie) et deux sous-classes d'anomalies dichromatiques (la protanopie et la deutéranopie) (voir le tableau 6). Les sujets qui ont ces types d'anomalies dans la perception des couleurs ont de la difficulté à distinguer le rouge des autres couleurs ou à détecter les feux rouges (confusion des couleurs), ou les deux.

Chez les trichromates protanomaux, on constate un décalage dans la région rouge du spectre qui peut entraîner une confusion du rouge et du brun et réduire la sensibilité à la lumière rouge comparativement aux trichromates normaux. On dit qu'ils ont une «faiblesse dans le rouge». Toutefois, il semble que le spectre plus étroit des DEL ne devrait pas causer plus de problèmes que le spectre plus large des feux à incandescence parce que le décalage entraîne une différence dans la perception de la couleur dans les deux cas. La différence dans les nuances, s'il y en a une, entre les deux types de feu n'empêcherait pas l'observateur de détecter les feux clignotants et de se rendre compte que ce sont des feux d'avertissement, car il n'y aura pas de confusion avec d'autres couleurs.

Chez les daltoniens dichromates, l'un des trois types de cônes est absent et ils ne peuvent percevoir l'une des couleurs de base. Les deux types de dichromates qui sont insensibles

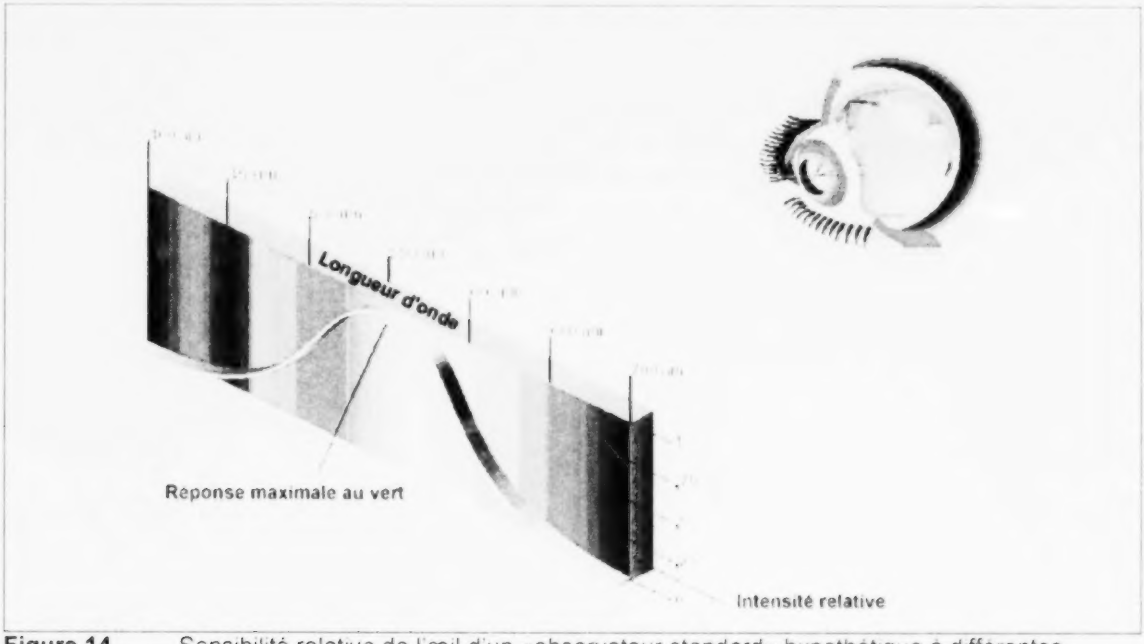


Figure 14 Sensibilité relative de l'œil d'un «observateur standard» hypothétique à différentes longueurs d'onde pour des niveaux d'éclairage normaux (courbe photopique de la CIE) [Silicon Graphics Computer Systems : http //www sgi com/products/legacy/displays html]

Les termes utilisés pour décrire les individus en ce qui concerne la perception des couleurs sont :

- les trichromates, qui peuvent percevoir les trois couleurs primaires;
- les dichromates, qui ne peuvent percevoir que deux des couleurs primaires;
- les monochromates, qui ne peuvent percevoir que le noir et le blanc.

Les conditions de daltonisme suffisamment courantes pour être importantes et qui sont liées à la perception des feux rouges sont un type d'anomalie trichromatique (la protanomalie) et deux sous-classes d'anomalies dichromatiques (la protanopie et la deutéranopie) (voir le tableau 6). Les sujets qui ont ces types d'anomalies dans la perception des couleurs ont de la difficulté à distinguer le rouge des autres couleurs ou à détecter les feux rouges (confusion des couleurs), ou les deux.

Chez les trichromates protanomaux, on constate un décalage dans la région rouge du spectre qui peut entraîner une confusion du rouge et du brun et réduire la sensibilité à la lumière rouge comparativement aux trichromates normaux. On dit qu'ils ont une «faiblesse dans le rouge». Toutefois, il semble que le spectre plus étroit des DEL ne devrait pas causer plus de problèmes que le spectre plus large des feux à incandescence parce que le décalage entraîne une différence dans la perception de la couleur dans les deux cas. La différence dans les nuances, s'il y en a une, entre les deux types de feu n'empêcherait pas l'observateur de détecter les feux clignotants et de se rendre compte que ce sont des feux d'avertissement, car il n'y aura pas de confusion avec d'autres couleurs.

Chez les daltoniens dichromates, l'un des trois types de cônes est absent et ils ne peuvent percevoir l'une des couleurs de base. Les deux types de dichromates qui sont insensibles

au rouge sont les protanopes et les deutéranopes. Les dichromates sont essentiellement incapables de distinguer les longueurs d'onde plus grandes que 540 nm. Par exemple, les protanopes associent le rouge à de très faibles intensités de jaune dans le spectre. Ils ont également une perte de sensibilité aux grandes longueurs d'onde (Pezoldt *et al.*, 1997). Dans le cas de ces dichromates, les signaux des DEL rouges sont plus perceptibles que ceux des ampoules à incandescence car le problème est plus prononcé aux grandes longueurs d'onde.

Tableau 6 – Classification et fréquence d'occurrence des systèmes héréditaires de perception des couleurs (Pezoldt *et al.*,1997)

Désignation	**Discriminations possibles**	**Pourcentage de la population**	
		Hommes	**Femmes**
Trichromate normal	Pâle-foncé Jaune-bleu Rouge-vert	**92,0**	**99,6**
Trichromate anormal		**5,9**	**0,4**
Protanormal	Pâle-foncé Jaune-bleu Rouge-vert (faiblesse dans le rouge)	1,0	0,02
Deutéranormal	Pâle-foncé Jaune-bleu Rouge-vert (faiblesse dans le vert)	4,9	0,38
Tritanormal	Pâle-foncé Jaune-bleu (faiblesse dans le bleu) Rouge-vert	0,0001	0,00
Dichromate		**2,1**	**0,03**
Protanope	Pâle-foncé Jaune-bleu	1,0	0,02
Deutéranope	Pâle-foncé Jaune-bleu	1,1	0,01
Tritanope	Pâle-foncé Rouge-vert	0,0001	0,00
Tétartanope	Pâle-foncé Rouge-vert	0,0001	0,00
Monochromate	Pâle-foncé	**0,003**	**0,002**
Tous les systèmes anormaux		**8,00**	**0,43**

Cole et Brown (1966) ont comparé la réponse d'observateurs ayant une perception normale des couleurs à celles d'un groupe de protanopes. Ils ont conclu que les conducteurs protanopes exigent un signal dont l'intensité est environ quatre fois celle requise par un conducteur normal, ce qui correspond à une intensité d'au moins 600 cd pour un feu de 8 po. Ils concluent toutefois qu'un feu d'intensité optimale pour les conducteurs normaux (de 160 à 260 cd) sera fort probablement détecté par les protonapes même si, en moyenne, leur temps de réponse est plus long.

Dans une revue de la littérature, Whillans et Allen (1992) ont conclu que les sujets daltoniens prennent de 42 à 98 % plus de temps que les sujets normaux pour répondre aux signaux de couleur. Ils signalent également que plusieurs types de lentilles cornéennes tintées peuvent

gêner les conducteurs qui ont une vision normale en rendant leur performance visuelle semblable à celle des daltoniens, ce qui nous amène au sujet suivant.

5.2 Lunettes de soleil

Quand les feux de signalisation à DEL ont été introduits, certains conducteurs ont déclaré que les feux à DEL jaunes étaient difficiles à voir avec leurs lunettes de soleil. Le problème est moins aigu avec les DEL rouges probablement parce que la plupart des lunettes de soleil sont conçues pour réduire la partie jaune du spectre, qui est associée à l'éblouissement solaire, et non la partie rouge. Néanmoins, selon Clark (1968), les lentilles de certaines lunettes de soleil utilisées dans ses expériences avec les feux à incandescence étaient suffisamment colorées pour réduire de façon significative le contraste entre un feu rouge et le fond de ciel.

Cohn *et al.* (1996) ont particulièrement examiné le problème des lunettes de soleil et de la perception des feux à DEL. Sur la base d'un nombre limité de tests, ils ont utilisé une intégration numérique et prévu que le «facteur de convivialité» des feux à DEL rouges AlInGaP pour un sujet portant des lunettes de soleil serait réduit d'environ 8 % comparativement à celui d'un sujet sans lunettes de soleil. Dans des tests de comparaison des feux à DEL rouges et des feux à incandescence, les différences de perception des deux types de feu par des sujets portant des lunettes de soleil n'étaient pas statistiquement significatives.

5.3 Vieillissement de l'oeil

En ce qui a trait au vieillissement de l'œil, on cite généralement les travaux de Fisher (1969). Celui-ci signale qu'avec le vieillissement les milieux oculaires jaunissent, ce qui a pour effet d'accroître le contraste entre le signal rouge et le fond de ciel. Il note toutefois que cet effet est plus qu'annulé par l'augmentation de la diffusion de la lumière dans l'œil, ce qui diminue le contraste. Il conclut que, dans certaines situations, les conducteurs âgés ont besoin d'une intensité et d'un contraste plus élevés dans les signaux de signalisation pour percevoir ceux-ci aussi efficacement qu'un conducteur de 20 à 25 ans.

Toujours d'après Fisher (1969), avec le vieillissement il faut augmenter le contraste (le rapport d'intensité entre le signal et le fond de ciel) pour assurer la fiabilité de la perception. À 50 ans, les exigences de contraste sont 1,5 fois celles d'une personne jeune, alors qu'à 70 ans le facteur est 3. Ces facteurs sont légèrement plus faibles pour le rouge et le jaune, et légèrement plus élevés pour le vert.

Une étude exhaustive des besoins et de la sécurité des conducteurs vieillissants a récemment été entreprise par la Federal Highway Administration de États-Unis. Staplin *et al.* (1997) concluent que «l'âge des conducteurs n'a pas été examiné en ce qui concerne la reconnaissance des feux de circulation; toutefois, pour ce qui est de la luminosité des feux de circulation, il semble que les conducteurs âgés ont une moins grande sensibilité à l'intensité et au contraste, mais non à la couleur».

Ces résultats indiquent que les conducteurs âgés n'auront aucune difficulté avec la couleur des feux à DEL car leur perception des couleurs ne se dégrade pas. Ils ont besoin d'un grand contraste et, en général, les feux à DEL peuvent offrir une plus grande intensité et, par conséquent, un plus grand contraste que les feux à incandescence.

5.4 Effet fantôme

Les effets fantômes sont constitués par la réflexion de la lumière solaire par un feu de signalisation qui donne l'impression que celui-ci est allumé. Cela peut être une source de confusion pour l'automobiliste à moins que l'intensité lumineuse du feu de signalisation ne soit beaucoup plus grande que celle provoquée par l'effet fantôme. Le rapport minimum acceptable recommandé pour les intensités du signal réel et du signal fantôme varie de 12:1 (Fisher, 1971) à 15:1 (CIE, publication 79, 1988).

D'après les données d'une étude de Fisher et Millard (1971), l'élimination des effets fantômes est un problème parce que la plupart des dispositifs conçus pour les limiter (p. ex., visières, volets, etc.) limitent également l'intensité du faisceau. L'utilisation de simples visières extérieures et d'une intensité de faisceau adéquate semblent être la meilleure solution.

Les feux de passage à niveau à incandescence comportent un réflecteur parabolique installé derrière l'ampoule, de sorte que la lumière solaire qui pénètre dans le feu peut être réfléchie suffisamment pour éclairer la lentille. Les feux à DEL ne comportent pas de réflecteurs et offrent par conséquent la possibilité de réduire les effets fantômes. De plus, ils n'ont pas besoin de lentilles colorées, de sorte que, quand les effets fantômes posent un problème, ce dernier peut être éliminé par l'utilisation d'une lentille non colorée au lieu d'une lentille rouge. Cohn *et al.* (1998) ont mené une expérience sur le terrain afin de comparer les effets fantômes dans les feux à DEL et les feux à incandescence et ont conclu qu'«il est facile de déterminer quand le feu rouge est allumé dans des conditions propices aux effets fantômes avec les feux à incandescence et les feux à DEL; toutefois, ces derniers ont un avantage important parce que leurs lentilles réfléchissent beaucoup moins de lumière solaire vers l'observateur». Ils n'ont pu répéter l'expérience en laboratoire, mais ont conclu que «la lumière réfléchie par les feux à incandescence est 50 % plus intense que celle réfléchie par la lentille des feux à DEL».

5.5 Brouillard

Pour ce qui est de la performance des feux à DEL dans des conditions de mauvaise visibilité comme le brouillard, une revue de la littérature effectuée en 1997 (NCHRP 5-15) conclut qu'«aucune recherche n'a porté directement sur les exigences d'intensité dans des conditions météorologiques défavorables».

Cohn *et al.* (1998) ont effectué deux expériences avec un brouillard artificiel pour comparer les feux à DEL et les feux à incandescence sur le terrain. Ils ont eu de la difficulté à maintenir un brouillard constant et étaient préoccupés par les différences possibles entre leur «brouillard artificiel» et un brouillard réel, mais ont conclu qu'il n'y avait pas de différence statistique entre les deux types de feux dans la comparaison des signaux en présence et en l'absence de brouillard.

D'après les lois de la physique, il est peu probable que la différence relativement mineure entre les longueurs d'onde des feux à incandescence rouges et des feux à DEL produise une différence importante dans la diffusion ou l'absorption de la lumière par ces deux types de feu en présence de brouillard.

L'un des avantages clés des modules de signalisation à DEL dans le brouillard est leur faisceau plus large. Étant donné qu'il est peu probable qu'un conducteur puisse apercevoir le feu à la distance d'alignement normale, l'intensité du feu à plus courte distance du passage à niveau

peut être très importante. Les modules à DEL permettent d'obtenir un faisceau plus large, de sorte que le feu peut être aperçu plus facilement en cas de brouillard.

5.6 Fréquence de clignotement

La fréquence de clignotement des feux à incandescence est limitée à environ 60 éclairs par minute, c'est-à-dire par la fréquence à laquelle l'ampoule s'allume et s'éteint. Si la fréquence de clignotement était plus élevée, l'ampoule pourrait avoir trop peu de temps pour s'éteindre complètement. La norme actuelle de 45-65 éclairs par minute (avant-projet de RTD10 Passages à niveau rail-route, 2000) n'est pas nécessairement optimisée pour obtenir la meilleure perceptibilité des feux, mais est plutôt basée sur ce qui est possible avec les feux à incandescence. On peut obtenir une fréquence de clignotement plus élevée avec les feux à DEL qui, en principe, s'allument instantanément, de sorte que l'on peut obtenir n'importe quelle fréquence de clignotement visible (et des fréquences encore plus élevées), du moment que le circuit d'alimentation n'impose pas de limite. La possibilité d'obtenir une fréquence de clignotement plus élevée est un avantage des feux à DEL. Il s'agit de savoir si cet avantage est bénéfique et s'il faut prescrire ou recommander une fréquence de clignotement plus élevée pour les feux à DEL.

Gerathewohl (1957) a constaté que les feux clignotants étaient généralement plus perceptibles que les feux stables de même contraste de luminance et que, quand ce contraste est faible, la perceptibilité des feux augmente avec la fréquence de clignotement, jusqu'à 3 éclairs/seconde, la perceptibilité maximale étant obtenue à 3 éclairs/seconde à un contraste de luminance de 1,0 ou plus.

Conners (1975) rapporte qu'il y a peu de différence dans les seuils de détection en fonction du taux de modulation du stimulus, bien que les fréquences de clignotement de 2 à 4 éclairs/seconde semblent être les plus efficaces en ce qui concerne le temps de réaction.

Hopkins et Holmstrom (1976) concluent que la fréquence de clignotement optimale pour la perceptibilité se trouve entre 90 éclairs par minute et de trois à quatre éclairs par seconde.

La Federal Highway Administration a effectué des tests qui montrent que «les fréquences de clignotement de plus de 100 éclairs par minute sont nettement plus efficaces que les fréquences plus basses». Elle recommande d'utiliser 110 éclairs par minute avec les paires de feux de passage à niveau de 8 pouces (FHWA-RD-77-167, 1977).

Ces quatre documents indiquent que l'on peut améliorer la perceptibilité en augmentant la fréquence de clignotement à deux ou trois éclairs par seconde. Toutefois, une expérience de Tansley (1988) a comparé cinq types de clignotement différents pour les feux de passage à niveau : 0,5 Hz en opposition de phase (0,5 éclair par seconde), 3 Hz (3 éclairs par seconde) en phase, 3 Hz en déphasage, 5 Hz (5 éclairs par seconde) en phase, et un signal à «modulation mixte» dans lequel étaient combinées des parties de chacun des quatre types précédents. Conclusion : «Tous les signaux présentés et évalués ici sont à peu près également efficaces pour produire des réactions rapides de la part des conducteurs».

Une augmentation de la fréquence de clignotement peut avoir des effets physiques indésirables sur les automobilistes. Une lumière qui clignote rapidement peut provoquer une crise chez les épileptiques. Cette condition s'appelle l'épilepsie photo-sensible. Moins de 5 % des épileptiques sont photo-sensibles (Harding et Jeavons, 1994), de sorte que cette condition n'est pas

courante. On la trouve surtout chez les enfants, où elle apparaît entre 8 et 20 ans. Son incidence est la plus prononcée vers 12 ou 13 ans et les filles sont plus touchées que les garçons. Un quart des patients cessent d'être photo-sensibles aux environs de 25 ans.

Parmi les stimuli, la télévision est le plus courant (60 %); elle est suivie par les lumières clignotantes naturelles et artificielles. La sensibilité varie avec la fréquence de clignotement comme on le voit à la figure 15. À une fréquence de trois éclairs par seconde, seulement 3 % de la population photo-sensible est stimulée, le maximum de 96 % étant atteint entre 15 et 20 éclairs par seconde (Harding, 1998). Ces données portent à penser que la fréquence de clignotement maximale devrait être voisine de 3 éclairs par seconde pour minimiser les risques chez les épileptiques photo-sensibles.

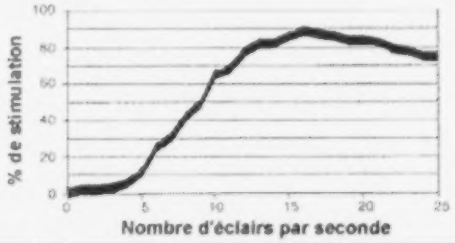


Figure 15 Stimulation de la population photo-sensible en fonction de la fréquence de clignotement (Harding et Jeavons, 1994)

Bien que les articles mentionnés ci-dessus ne soient pas unanimes dans leurs conclusions quant à la fréquence de clignotement la plus efficace, les feux à DEL permettent d'augmenter la fréquence de clignotement au besoin et sont par conséquents une amélioration par rapport aux feux à incandescence, lesquels sont limités aux fréquences de clignotement existantes.

5.7 Temps de montée et temps de descente

Le temps de montée et le temps de descente d'un signal sont respectivement le temps qu'il faut à celui-ci pour atteindre son intensité maximale à partir de zéro et pour passer de son intensité maximale à zéro. Les temps de montée et de descente d'une ampoule à incandescence sont de l'ordre de 0,15 seconde ou plus, alors qu'une diode électroluminescente peut s'allumer instantanément. Si on suppose que les DEL ont une réponse instantanée, l'intensité lumineuse apparente d'un feu à DEL et celle d'un feu à incandescence varient comme le montre la figure 16.

Si l'intensité d'un feu atteint sa valeur maximale instantanément, la perceptibilité du feu est améliorée de façon importante. Par exemple, l'intensité lumineuse effective (I_e) d'une onde carrée d'une période de 0,5 seconde émise par une diode est de 0,91 fois l'intensité lumineuse maximale (I_{max}) d'après la loi d'Allard, qui évalue la capacité de l'œil à percevoir un éclair bref. Avec un feu à incandescence qui s'allume et s'éteint lentement, on obtient une onde sinusoïdale dont l'intensité effective est de 0,61 fois l'intensité maximale. Dans cet exemple, le feu à diodes semblerait 50 % plus intense qu'un feu à incandescence de même intensité maximale nominale.

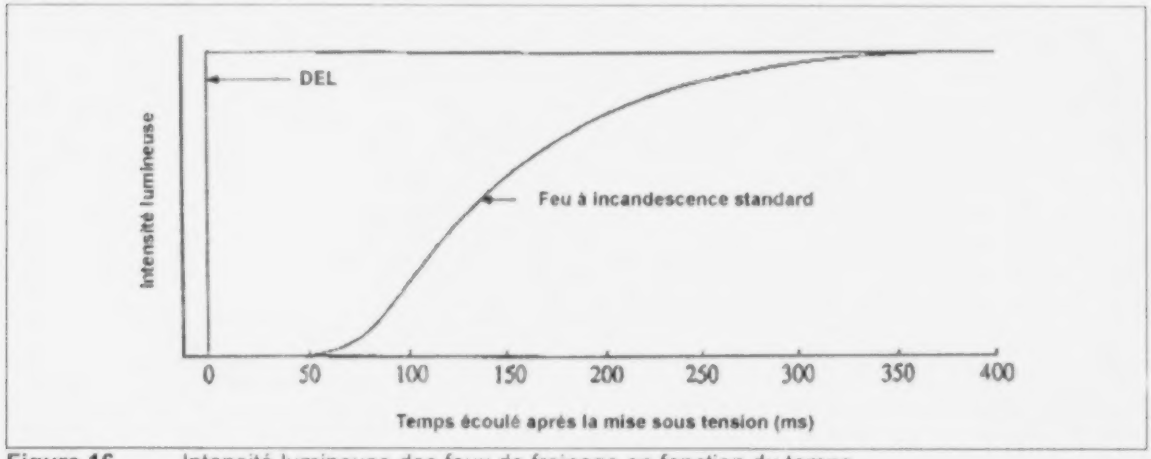


Figure 16 Intensité lumineuse des feux de freinage en fonction du temps après leur mise sous tension (Sivak *et al.*, 1993)

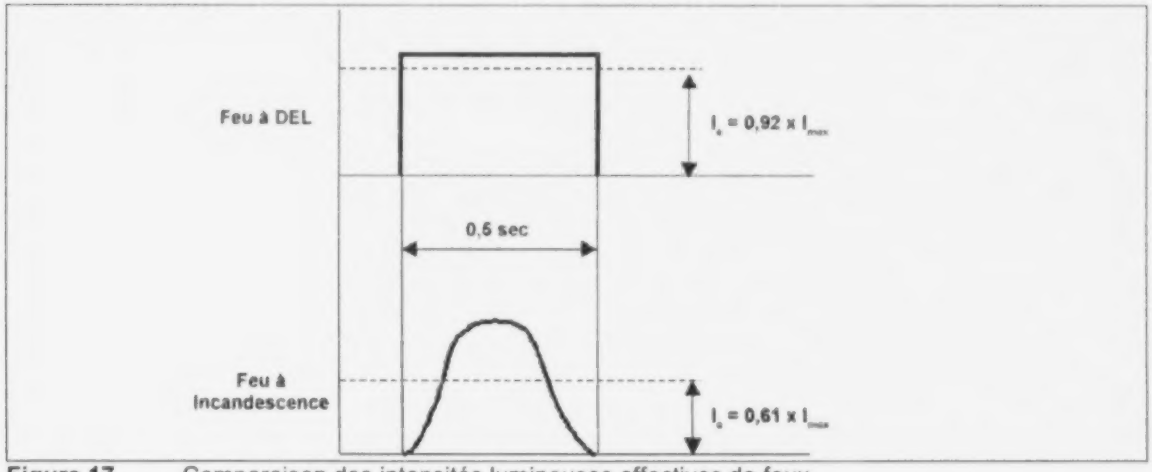


Figure 17 Comparaison des intensités lumineuses effectives de feux à montées instantanée et lente

5.8 Réponse logarithmique de l'œil

Pour comprendre les données d'intensité lumineuse, il est important de tenir compte du fait que l'œil humain, comme l'oreille humaine, est un «appareil» logarithmique.

Pour examiner l'ouïe, on utilise le décibel comme unité de mesure du niveau sonore; c'est une unité logarithmique. Dans la mesure de l'intensité lumineuse, on n'utilise pas d'unités logarithmiques et il faut prendre soin de bien interpréter les données. Une source de lumière d'une intensité de 1 000 cd ne semble pas 10 fois plus brillante qu'une source d'une intensité de 100 cd; la différence apparente n'est que de 7 % environ.

La bibliographie sur la réponse logarithmique de l'œil est considérable. En voici des extraits :

«La luminosité, qui est un descripteur impossible à mesurer, est définie par la CIE comme étant l'attribut d'une sensation visuelle qui fait qu'une zone semble émettre plus ou moins de lumière, et qui est par conséquent une fonction non linéaire de la luminance. L'œil humain a une

réponse non linéaire à la luminosité. Cette réponse perceptuelle à la luminance est appelée CLARTÉ par la CIE et est approximativement logarithmique pour l'œil humain.» (Ferrer-Roca, 2001)

«La loi de Weber-Fechner ($L = cL_B$, c = 0,01, ... 0,02) implique une relation logarithmique entre la luminance physique et la luminosité perçue subjectivement.» (Bernd, 2002)

«Il existe une évidence expérimentale considérable indiquant que la luminosité subjective, c.-à-d. la luminosité telle que perçue par l'appareil de vision humain, est une fonction logarithmique de l'intensité lumineuse incidente dans l'œil. Cette caractéristique est illustrée à la figure 18 qui est le graphe de l'intensité lumineuse en fonction de la luminosité subjective.» (Courses Notes on Human Vision, 1977)

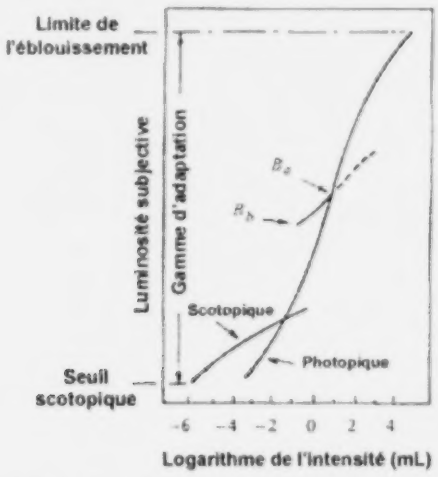


Figure 18 Intensité lumineuse en fonction de la luminosité subjective

L'utilisation d'une échelle logarithmique au lieu d'une échelle linéaire pour comparer les normes de différentes instances réduit considérablement la différence apparente entre ces normes.

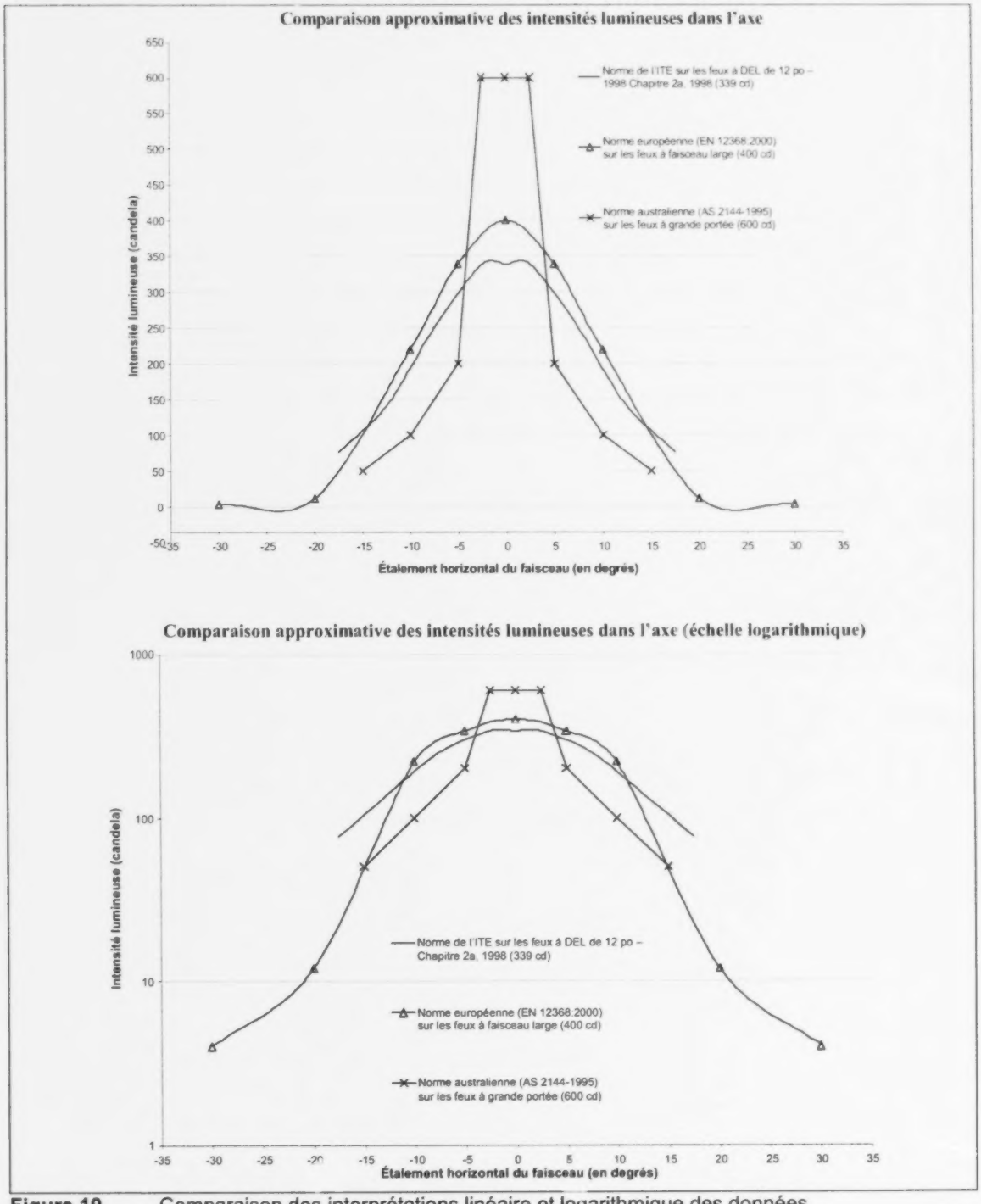


Figure 19 Comparaison des interprétations linéaire et logarithmique des données

5.9 Taille des feux

Un travail de recherche de Cole et Brown (1968) indique que la taille des feux de circulation n'est pas importante parce que ceux-ci semblent être des sources ponctuelles plutôt que des sources étendues quand ils sont aperçus d'une certaine distance et que, par conséquent, la distance de visibilité ne dépend que de leur intensité.

Toutefois, des tests décrits dans un rapport de la Federal Highway Administration (FHWA-RD-77-167, 1977) soulignent l'importance du flux lumineux (produit de l'intensité par la surface du feu) par rapport à l'intensité et montrent qu'une paire de feux clignotants de 12 po est très préférable à une paire de feux clignotants de 8 po de plus grande luminosité. Ces tests montrent qu'à 450 pi, en l'absence de toute obstruction visuelle et avec un espacement de 10-12 pi entre les têtes de feux de 8 et de 12 po, les deux têtes semblent avoir des tailles «très» différentes.

La plupart des administrations routières utilisent des feux de circulation de 12 po (300 mm) à tous les endroits périlleux et sur toutes les routes à circulation rapide; les feux rouges de 12 po sont utilisés quasi universellement, les feux verts et jaunes étant plus petits.

Aux États-Unis, tous les nouveaux feux à DEL installés aux passages à niveau sont des feux de 300 mm (12 po). Au Canada, presque tout le parc installé est constitué de feux de 200 mm et cette taille a été jugée satisfaisante. L'introduction de feux à DEL de cette taille augmentera leur perceptibilité à cause de divers facteurs que nous avons déjà discutés. Toutefois, afin de renforcer la sécurité, le remplacement de ces feux par des feux de 300 mm serait avantageux car aux courtes distances (à moins de 200 m environ), les feux de 300 mm sont beaucoup plus visibles parce qu'ils ont une surface 2,25 fois plus grande.

5.10 Écran de visibilité

La question de la taille et de la couleur des écrans de visibilité a été discutée durant plusieurs décennies. L'utilisation d'écrans noirs autour des feux pour en augmenter la perceptibilité a été examinée par Cole et Brown (1966) et Jainski et Schmidt-Clausen (1967). Ces deux études montrent que, à mesure que la taille de l'écran augmente, l'intensité lumineuse requise décroît. Cole et Brown signalent que si l'écran est de couleur pâle, sa luminance pourrait devenir voisine de celle du ciel. Jainski et Schmidt-Clausen ont montré que, quand le contraste entre l'écran et l'arrière-plan diminue, l'intensité requise augmente rapidement et pourrait même atteindre ou dépasser la valeur requise sans écran.

Fisher et Cole (1974) recommandent d'utiliser des écrans d'une largeur au moins trois fois celle du diamètre du feu et de couleur noir mat.

Plus récemment, on a utilisé des écrans jaunes et ceux-ci se sont avérés préférables dans certaines situations. Les écrans jaunes sont très avantageux quand le soleil est devant le feu, quand les feux installés sur le bord de la route ont un arrière-plan d'arbres et d'immeubles, pour les feux en porte-à-faux avec fond de ciel bleu, et durant la nuit quand les écrans noirs sont complètement invisibles. L'autre avantage important des écrans et des visières jaunes est qu'ils abaissent la température à l'intérieur du feu, ce qui est important pour les feux à DEL car leur performance décroît quand la température augmente. L'avantage des écrans noirs est qu'ils améliorent la visibilité des feux en plein soleil ou quand le ciel n'est pas très clair et bleu (Coghlan, 1999).

Les inspecteurs de la sécurité ferroviaire de Transports Canada présents à une évaluation des feux à DEL avec écran de visibilité jaune s'accordaient à dire que les écrans jaunes attirent l'attention sur le passage à niveau et ses feux de signalisation même quand ceux-ci ne sont pas allumés et améliorent la perceptibilité du passage à niveau et du système d'avertissement (Coghlan, 1999).

À l'heure actuelle, on n'utilise que des écrans de visibilité noirs aux passages à niveau au Canada. Cependant, les feux de signalisation sont équipés d'écrans noirs ou jaunes. Le Manuel canadien de la signalisation routière (section B3.2.3, 1998) fait la recommandation suivante : «l'écran de visibilité devrait être jaune bien qu'un revêtement noir mat puisse être utilisé lorsque celui-ci est jugé plus efficace».

5.11 Intensité lumineuse excessive

L'intensité lumineuse d'un feu peut parfois être trop grande la nuit et être gênante pour les conducteurs.

- Une étude du British Transport and Road Research Laboratory indique que le seuil d'éblouissement pour les routes bien éclairées est de l'ordre de 700 cd et qu'il est de l'ordre de 450 cd pour les routes mal ou non éclairées (Hulscher, 1975).
- D'après une étude de Rutley, Christie et Fisher (1965), les seuils d'éblouissement sont les suivants : 460 cd pour les routes à circulation libre rapide en phares code, 700 cd pour une rue commerciale normale, 350 cd pour une avenue résidentielle, et 715 cd dans un centre-ville. Ces résultats sont basés sur l'évaluation des signaux lumineux dans l'axe à une distance de 33 m.
- La section 4.1.2 de la norme de l'ITE sur les DEL (chapitre 2a, 1998) stipule que «dans la gamme de températures d'utilisation spécifiée à la section 3.1.1 pendant la période de garantie, l'intensité lumineuse maximale des feux de 8 ou 12 po ne doit pas dépasser 800 cd pour les feux rouges, ...».
- La norme européenne sur les feux de circulation (EN 12368:2000) exige que ceux-ci aient une intensité maximale de 1 000 cd sur les routes à circulation rapide.

L'intensité des feux peut être réduite la nuit, mais cela complique le circuit d'alimentation et augmente la probabilité de défaillance tout en réduisant la probabilité d'obtenir la durée de vie désirée de 15 ans pour les têtes de feux.

5.12 Conclusions sur les facteurs humains

La discussion ci-dessus se rapportant aux facteurs humains liés à l'utilisation de feux à diodes électroluminescentes porte à croire que ceux-ci sont à tout le moins aussi efficaces, sinon plus, que les feux à incandescence pour tous les facteurs humains. Il n'y a pas d'indication de problème ou de performance médiocre dans aucun domaine.

Les diodes rouges sont maintenant plus couramment utilisées dans les feux de circulation, les feux de freinage de véhicule et les applications connexes comme les feux arrière des bicyclettes. Avec des millions de ces feux en usage, on constate qu'il n'y a aucun problème avec leur perceptibilité car ces problèmes se seraient déjà manifestés de façon très évidente. Nous concluons que l'examen des facteurs humains et de l'expérience pratique accumulée portent à croire que les diodes électroluminescentes améliorent la perceptibilité des feux et, par conséquent, la sécurité aux passages à niveau.

6. BESOINS DES CONDUCTEURS

Les normes de l'AAR et de l'AREMA sont basées sur la distance nécessaire pour avertir les conducteurs de l'approche d'un train. Il est évident que les conducteurs doivent avoir le temps de s'arrêter après avoir aperçu le feu de signalisation. Celui-ci doit donc avoir une luminosité suffisante pour avertir le conducteur à une distance qui lui permettra de réagir à temps.

Les exigences d'alignement des modules de signalisation spécifient la distance requise. Les spécifications de la norme technique de Transports Canada sur les passages à niveau en ce qui concerne les distances d'alignement en fonction de la vitesse des véhicules sont indiquées au tableau 7. La distance d'alignement maximale pour une vitesse d'approche de 100 km/h est de 300 m ou 1 000 pi. La portée de 1 500 pi exigée pour les oculaires à grande portée des modules de signalisation est présumément un facteur de sécurité imposé pour que le feu ait une luminosité suffisante à la distance d'alignement.

Tableau 7 – Alignement des feux avant (Partie C – *Exigences techniques concernant les systèmes d'avertissement de passage à niveau*, RTD 10 Passages à niveau rail-route, avant-projet, 7 mars 2002)

Vitesse maximale admissible sur la route (km/h)	Distance recommandée de l'ensemble de feux clignotants primaire (m)	Distance minimale de l'ensemble de feux primaire pour voitures de tourisme et camions légers (m)	Distance minimale de l'ensemble de feux clignotants primaire pour camions lourds (m)	Distance ajoutée par pourcentage de descente (m)		Distance soustraite par pourcentage de montée (m)	
				5 %	10 %	5 %	10 %
40	100	65	70	3	6	3	5
50	125	85	110	5	9	3	6
60	160	110	130	7	16	5	9
70	195	135	180	11	23	8	13
80	235	165	210	15	37	11	20
90	295	195	265	* Pour les vitesses supérieures à 80 km/h, la distance doit être ajustée en fonction de la pente.			
100	360	235	330				
110	390	275	360				

Les diagrammes de rayonnement des feux de passage à niveau et des feux de circulation ont changé considérablement. Le diagramme de rayonnement utilisé doit être déterminé par les besoins des conducteurs. Le tableau 8 montre les variations de l'angle vertical et de l'angle horizontal quand un conducteur s'approche d'un feu de signalisation sur une route en ligne droite.

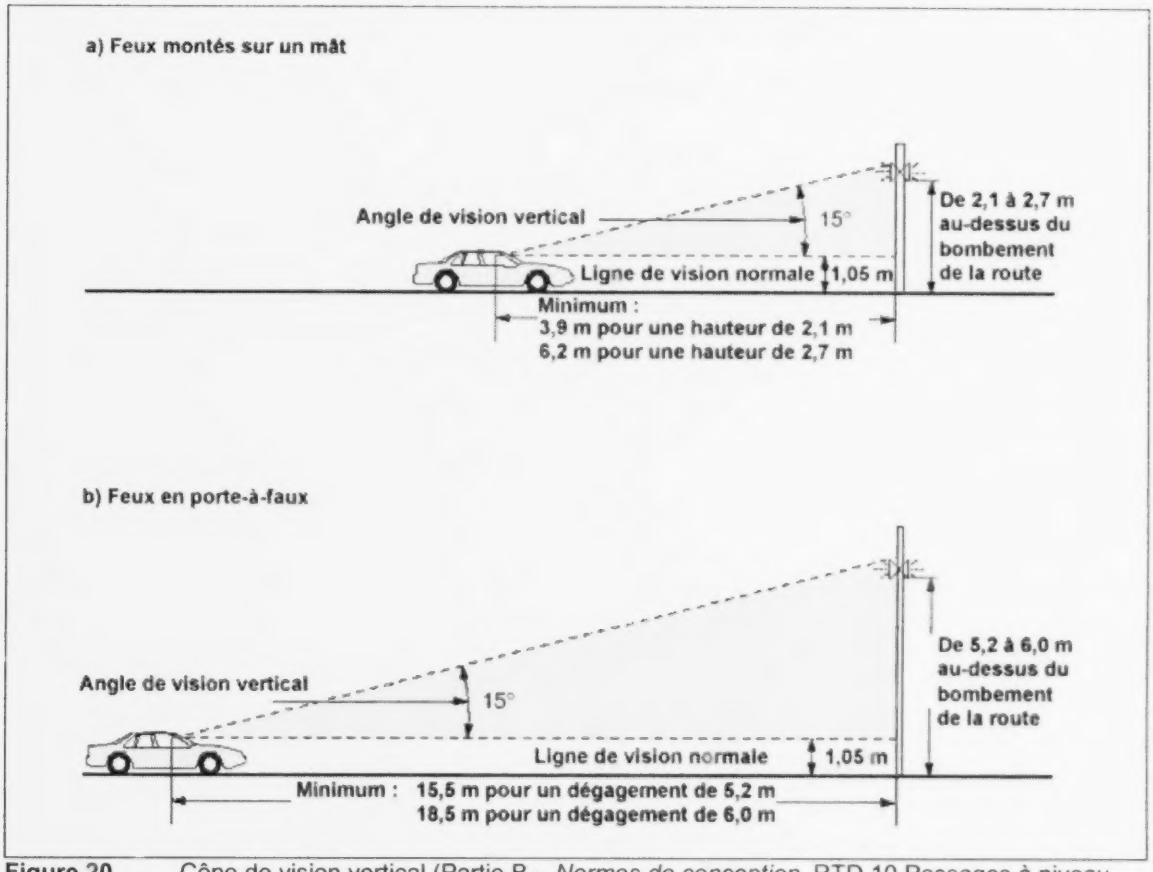


Figure 20 Cône de vision vertical (Partie B – *Normes de conception*, RTD 10 Passages à niveau rail-route, avant-projet, 7 mars 2002)

Tableau 8 – Angles verticaux et horizontaux d'approche d'un feu monté sur un mât

Distance du feu (pi)	Angle vertical (hauteur du feu : 10 pi; hauteur du conducteur : 4 pi)	Angle horizontal (décalage horizontal de 10 pi entre le conducteur et le feu)	Angle horizontal (décalage horizontal de 20 pi entre le conducteur et le feu)
1000	0,35	0,57	1,15
500	0,69	1,15	2,3
100	3,43	5,7	11,3
50	6,8	11,3	21,8
20	16,7	26,6	45
10	31,0	45	63

Tableau 9 – Angles verticaux et horizontaux d'approche d'un feu en porte-à-faux

Distance du feu (pi)	Angle vertical (hauteur du feu : 20 pi; hauteur du conducteur : 4 pi)	Angle horizontal (aucun décalage horizontal entre le conducteur et le feu)
1000	0,92	0
500	1,83	0
100	9,1	0
50	17,7	0
20	38,7	0
10	58	0

La capacité du conducteur à percevoir la tête de feu dépend de trois facteurs :

a) de la hauteur de son oeil;
b) de la superficie du pare-brise;
c) des positions verticale, horizontale et longitudinale de la tête de feu.

Étant donné que les deux premiers paramètres échappent au contrôle du concepteur de feux, il est très important d'examiner soigneusement la géométrie de chaque croisement afin de déterminer l'emplacement optimal pour la tête de feu, comme on le voit à la figure 20.

La position horizontale de la tête de feu est basée sur le cône de vision du conducteur et sur la largeur des rues qui se croisent. Les études montrent que les conducteurs ont une excellente vision latérale jusqu'à 5° de chaque côté de la ligne médiane de la position de l'œil (un cône d'une ouverture de 10°) et une vision latérale adéquate jusqu'à 20° de chaque côté. Par conséquent, il est souhaitable d'installer la tête de feu primaire dans le cône de vision de 10° et la tête secondaire dans le cône de 40° (comme on le voit à la figure 21).

L'angle horizontal varie jusqu'à deux fois plus que l'angle vertical. Si la route n'est pas rectiligne mais courbe, l'angle horizontal varie encore plus. Ces considérations suggèrent qu'il est plus important d'utiliser un faisceau large horizontalement plutôt que verticalement. Par le passé, l'AAR exigeait des diagrammes de rayonnement environ 15 fois plus large horizontalement que verticalement, ce qui semble exagérément large dans le plan horizontal. Le diagramme de rayonnement universel proposé par l'AREMA en 1999 a un rapport de 1:1 entre les plans horizontal et vertical (diagramme de rayonnement circulaire), ce qui semble être une correction exagérée par rapport au faisceau très étroit utilisé auparavant. Notre spécification d'utiliser un rapport de largeurs de 2,5:1 entre le diagramme horizontal et le diagramme vertical s'aligne sur celle de l'ITE.

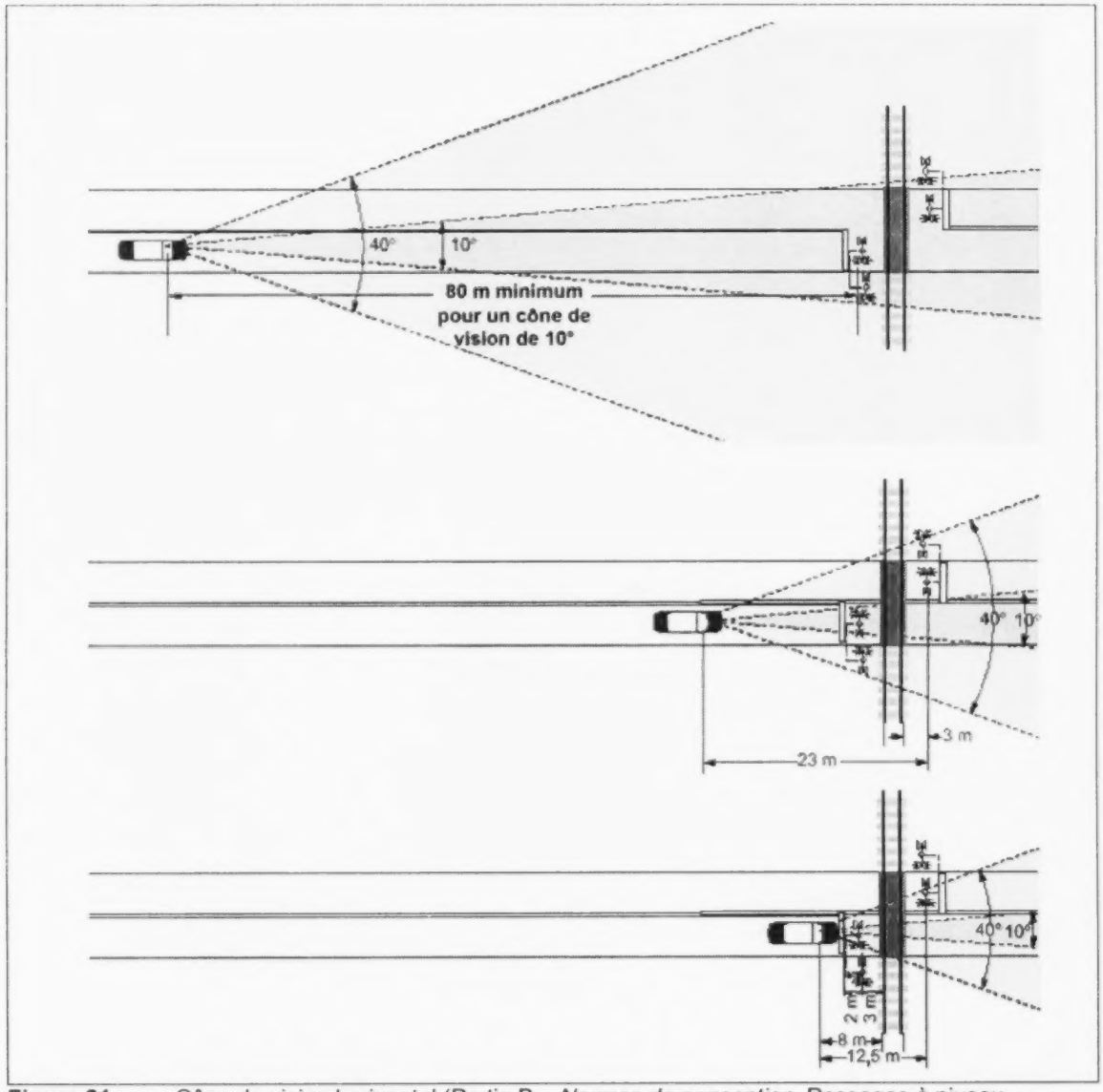


Figure 21 Cône de vision horizontal (Partie B – *Normes de conception*, Passages à niveau rail-route, avant-projet, 7 mars 2002)

6.1 Calcul de l'intensité lumineuse requise d'après les besoins des conducteurs

La norme actuelle de l'AREMA pour les feux de passage à niveau exige une distance de visibilité de 1 500 pi (Manual Part 3.2.35, AREMA, 1999). Cette distance était également celle utilisée par l'AAR jusqu'en 1968. Cette année-là, l'AAR a remplacé cette distance requise par une intensité lumineuse requise de 1 600 cd pour les feux à faisceau étroit et de 1 200 cd pour les feux à faisceau large. En 1996, dans une autre norme visant les feux à diodes électroluminescentes, l'AAR a remplacé la distance requise de 1 500 pi par une intensité requise de 160 cd avec un faisceau circulaire beaucoup plus large.

Il est difficile de calculer l'intensité lumineuse nécessaire pour qu'un feu soit perçu par les conducteurs à une distance donnée durant le jour. Le facteur le plus important pour la distance de perception diurne est constitué par la quantité de lumière dans le milieu ambiant ou l'éclairement. Les autres facteurs sont la taille du feu, la présence d'un écran de visibilité, la distraction du conducteur, l'âge du conducteur, le daltonisme du conducteur et la position du soleil.

6.1.1 Algorithme pour les feux de circulation

Dans une large mesure, les diverses recommandations parues dans la littérature scientifique sur l'intensité lumineuse des feux de circulation et les diagrammes de rayonnement des signaux lumineux ont été dérivés analytiquement de travaux de recherche de Cole et Brown publiés en 1966 et 1968. Étant donné que ces travaux sont fréquemment cités, leurs principaux résultats sont résumés ci-dessous :

Barry L. Cole et Brian Brown, 1966, *Optimum Intensity of Red Road-Traffic Signal Lights for Normal and Protanopic Observers.* Journal of the Optical Society of America, v 56, no. 4

Les mesures ont porté sur les temps de réaction et les signaux non perçus quand les sujets regardaient directement dans la direction du feu en effectuant une opération de conduite. Les conclusions étaient les suivantes :

Conclusions de cet article :

- une intensité de 83-133 cd est désirable pour percevoir un feu rouge de 8 pouces à 100 m avec une luminance de fond de ciel de 2 136 cd/m^2;
- une intensité de 160-260 cd est désirable pour percevoir un feu rouge de 8 pouces à 100 m avec une luminance de fond de ciel de 10 279 cd/m^2.

Barry L. Cole, Brian Brown, 1968, *Specification of Road Traffic Signal Light Intensity.* Human Factors, 10(3)

Dans cette étude, on a utilisé des sujets installés dans une pièce qui devaient observer un disque lumineux tout en effectuant des opérations de conduite simulée. L'intensité optimale à une distance de perception de 100 m a été déterminée en extrapolant à 100 m la distance expérimentale de 4 m à l'aide de la loi de l'inverse des carrés, et en extrapolant à 2 919 L-pi (10^4 cd/m^2) la luminance de fond de ciel expérimentale de 600 L-pi (2056 cd/m^2) par un simple calcul de proportionnalité.

Luminance de fond de ciel et intensité optimale calculée dans l'expérience I pour un feu de signalisation rouge

Taille du feu (minutes d'arc)	Critère : temps de réponse de base de 0,1 s	Critère : «limite supérieure»
	Intensité optimale [cd] pour une perception à 100 m et une luminance de fond de ciel de 2 919 L-pi (10^4 cd/m^2)	Intensité optimale [cd] pour une perception à 100 m et une luminance de fond de ciel de 2 919 L-pi (10^4 cd/m^2)
4,1	158	582
5,5	68	154
8,2	57	193
11	65	162
16,5	77	165

- L'intensité optimale ne dépend pas de l'angle sous-tendu par le feu à l'œil du conducteur pour la gamme de valeurs utiles. Il s'ensuit que, pour la signalisation à grande distance, un feu de grande taille n'offre aucun avantage comparativement à un feu plus petit de même intensité quand l'intensité est optimale. Un feu de grand diamètre peut être nécessaire pour obtenir l'intensité appropriée à la distance de perception, et son utilité sera déterminée par sa capacité à fournir un faisceau de grande intensité; par elle-même, une taille plus grande ne rend pas un feu plus efficace.
- Quand deux feux de tailles différentes ont la même intensité non optimale, le plus petit est le plus efficace.
- Une intensité entre 150 et 300 cd serait raisonnable comme intensité optimale quand on observe le feu d'une distance de 100 m avec une luminance de fond de ciel de 2 919 L-pi (10^4 cd/m^2).
- Les conducteurs protanomaux ont besoin d'un signal dont l'intensité est plusieurs fois celle qui est nécessaire à un conducteur dont la vision est normale, mais un signal d'intensité optimale pour un conducteur normal sera probablement perçu par un conducteur à «faiblesse dans le rouge» même si le temps de réponse de ce dernier est plus long de 200 ms en moyenne.
- Une valeur élevée de 8 000 ou 10 000 L-pi pour la luminance du fond de ciel a été utilisée dans la conception parce que la luminance du fond de ciel près de l'horizon dépasse 2 919 L-pi durant plusieurs heures par temps ensoleillé ou légèrement nuageux sur un arc horizontal d'environ 60°.
- Un relevé des feux de circulation de Melbourne (Australie) a montré que les feux rouges de 8 pouces avaient une intensité moyenne de 46 cd.
- Le principal résultat de cette recherche a été l'élaboration d'une formule qui donne l'intensité de crête optimale d'un feu rouge en fonction de la distance d'observation et de la luminance du fond de ciel. Cette formule est la suivante :

$$I_d = 2 \times d^2 \times L_b \times 10^{-6}$$

où

I_d = intensité à la distance d [cd]
d = distance du feu [m]
L_b = luminance du fond de ciel [cd/m^2]

En utilisant la formule Cole et Brown pour calculer la relation entre la distance d'observation et l'intensité de crête optimale d'un feu rouge, on obtient les tableaux suivants :

Luminance élevée (10 000 cd/m^2) par une journée ensoleillée

Intensité du feu (cd)	100	200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600
Distance (m)	71	100	141	173	200	224	245	265	283
Distance (pi)	233	328	463	568	656	735	804	869	928

Luminance plus faible (3 000 cd/m^2)

Intensité du feu (cd)	100	200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600
Distance (m)	129	181	258	317	366	409	448	484	517
Distance (pi)	423	594	846	1 040	1 201	1 342	1 470	1 588	1 696

D'après l'algorithme, il faut une intensité de 4 180 cd par une journée ensoleillée (10 000 lux) ou de 1 253 cd par temps couvert (3 000 lux) pour qu'un feu rouge ait une intensité de crête optimale à 1 500 pi.

Le calcul montre qu'il y a une différence d'un facteur trois au moins dans l'intensité lumineuse nécessaire selon les conditions d'ensoleillement. Il faut également définir ce que l'on entend par l'intensité «de crête optimale» du feu rouge. Dans l'article de Cole et Brown, il s'agit de

l'intensité nécessaire pour obtenir une réponse de freinage efficace. On ne sait pas si cela correspond à la définition de l'AAR dans l'établissement de la distance de perception. Il est probable que l'AAR pensait à la distance à laquelle un observateur attentif va vraisemblablement apercevoir le feu.

6.1.2 Algorithme pour les feux de passage à niveau

L'AAR (1968) utilise une formule semblable, mais avec une constante différente, pour calculer la portée à partir de l'intensité lumineuse. Elle utilise la formule ci-dessous établie par US&S et GRS en 1930 (reproduite dans un document de McKnight, 1999) :

$$D = 161{,}25 \times \sqrt{BCP}$$

où

D = portée du feu en pieds
BCP = intensité du faisceau (en cd) mesurée au-delà de la lentille

(Apparemment cette formule tient compte du fait que la formule originelle supposait que l'intensité lumineuse pouvait être mesurée sans lentille et qu'une lentille rouge a une transmissivité de 0,16.)

Intensité du signal (cd)	100	200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600
Portée (pi)	1 612	2 250	3 225	3 940	4 580	5 100	5 600	5 950	6 450

D'après cette formule, une intensité de 100 cd est suffisante pour que le feu soit perçu à une distance de 1 500 pi. Par conséquent, l'exigence visant à garantir la perceptibilité du feu est très différente de celle de produire un «signal efficace» aux fins du freinage.

6.1.3 Algorithme pour les feux de navigation maritime

Les feux de navigation maritime sont peut-être les feux soumis aux exigences les plus rigoureuses en ce qui concerne les diagrammes de rayonnement et les intensités car, par le passé, les navigateurs devaient se fier exclusivement aux feux de navigation pour se diriger, ne pouvant se guider au moyen de routes ou de panneaux de signalisation. L'organisme international qui établit les normes pour les feux de navigation dans le monde est l'Association internationale de signalisation maritime (AISM). L'algorithme utilisé par l'AISM est basé sur la loi d'Allard et les portées diurnes des feux sont calculées à partir d'hypothèses sur la quantité minimale de lumière nécessaire à l'œil humain moyen pour percevoir un feu (le seuil d'éclairement) et sur la clarté de l'atmosphère (visibilité météorologique). Le calcul de la portée diurne est exposé comme suit :

Par définition, la portée d'un feu est la distance maximale à laquelle il peut être aperçu, telle que déterminée par son intensité lumineuse, la visibilité météorologique et le seuil d'éclairement à l'œil d'un observateur. La portée «nominale» est la portée lumineuse d'un feu quand la visibilité météorologique est de 18,5 km (10 milles marins) et qu'un seuil d'éclairement de 1 000 microlux est utilisé pour la perception diurne. La portée «nominale» est calculée à l'aide de la loi d'Allard (Association internationale de signalisation maritime, 1974) :

$$E = I \cdot T^D / D^2$$

où

D = distance entre l'observateur et le feu (mètres)
T = transmissivité de l'atmosphère
E = seuil d'éclairement [éclairement à l'œil de l'observateur (lux)]
I = intensité lumineuse du feu (candelas).

La transmissivité et la visibilité météorologique sont liées par l'équation

$$T^V = 0{,}05$$

où :

V = visibilité météorologique (mètres).

Par conséquent, la loi d'Allard peut être exprimée sous la forme

$$I = E \cdot D^2 \cdot (0{,}05)^{-D/V}$$

En utilisant les valeurs données pour E et V, on peut calculer la portée pour la gamme d'intensités ci-dessous :

Intensité du feu (cd)	100	200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600
Portée (m)	560	778	1 074	1 292	1 471	1 624	1 760	1 882	1 994
Portée (pi)	1 836	2 551	3 522	4 238	4 824	5 327	5 772	6 173	6 539

On obtient le graphe ci-dessous pour la portée diurne en fonction de l'intensité lumineuse :

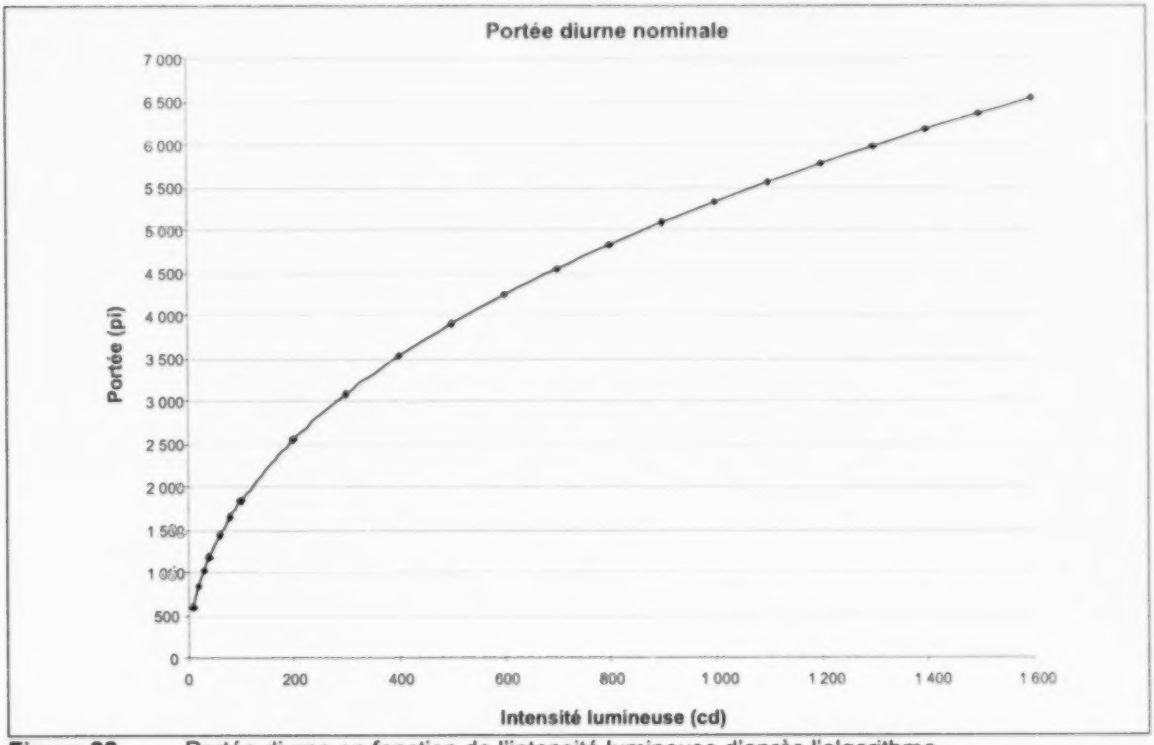


Figure 22 Portée diurne en fonction de l'intensité lumineuse d'après l'algorithme pour les feux de signalisation maritime

La loi d'Allard est également utilisée pour calculer la portée nocturne nominale. La seule différence entre les calculs des portées nocturnes et diurnes est le seuil d'éclairement (E) : E est de 1 000 microlux le jour (comme nous l'avons vu ci-dessus), mais de 0,2 microlux la nuit (Association internationale de signalisation maritime, 2001). Les portées nocturnes sont beaucoup plus grandes comme on le voit à la figure 23.

Intensité du feu (cd)	100	200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600
Portée (m)	10 043	12 062	14 270	15 641	16 648	17 448	18 113	18 683	19 182
Portée (pi)	32 940	39 564	46 804	51 304	54 607	57 229	59 410	61 279	64 376

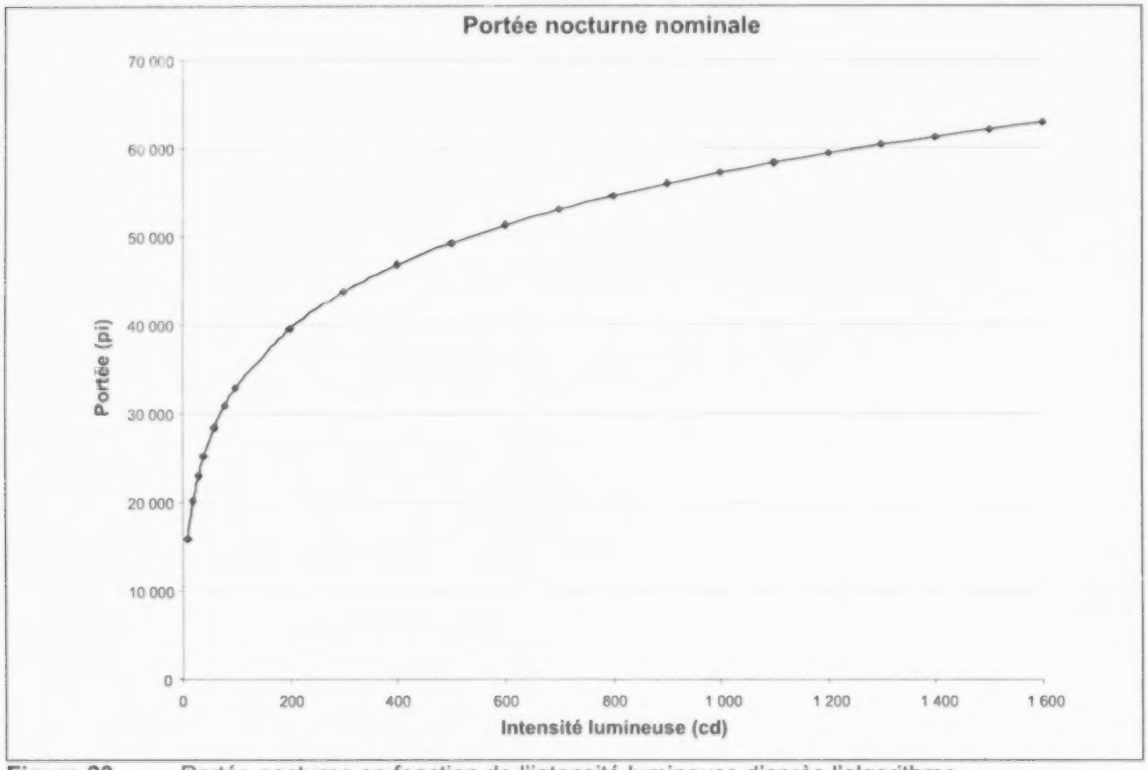


Figure 23 Portée nocturne en fonction de l'intensité lumineuse d'après l'algorithme pour les feux de navigation maritime

Les algorithmes pour les feux de navigation maritime et les feux de passage à niveau portent à croire que les intensités diurnes requises devraient être les mêmes et d'environ 100 cd pour une portée de 1 500 pi. L'algorithme de Cole et Brown, qui tente de calculer l'intensité de crête «optimale» pour la réaction du conducteur, indique que l'intensité requise devrait être de 4 000 cd pour une portée de 1 500 pi dans les conditions supposées par les autres algorithmes. Ces méthodes de calcul de l'intensité lumineuse à partir des besoins du conducteur donnent des «fourchettes» pour l'intensité lumineuse requise, mais n'indiquent pas comment déterminer l'intensité «exacte».

6.1.4 Recommandations sur l'intensité lumineuse dans la littérature scientifique

La présente étude n'est pas la seule qui a cherché à déterminer l'intensité lumineuse optimale pour les feux de signalisation. La littérature scientifique, qui porte presque exclusivement sur les exigences pour les feux de circulation, nous donne un certain nombre de recommandations spécifiques sur les intensités lumineuses requises. Les documents suivants, qui sont cités par ordre chronologique, fournissent des opinions scientifiques sur la luminance requise pour les feux de circulation :

- *W. Adrian, Lichttechnik 15, 115 (1963)* : Une intensité de 200 cd est recommandée pour la perception d'un feu de 8 po dans une luminance de fond de ciel de 3 000 cd/m^2 (cité par Cole et Brown, 1966).
- *H. Boisson et R. Pages. 1964. Compte rendu, Quinzième session, Vienne (Publication 11D de la CIE)* : Une intensité de 200 cd est suffisante avec une luminance de fond de ciel de 10^4 cd/m^2 à une distance de 100 m (cités par Cole et Brown, 1966).
- *Rapport non publié du Road Research Laboratory, Angleterre* : Pour un feu rouge de 8 po aperçu à une distance de 400 verges (366 m), il faut une intensité d'environ 600 cd par une journée ensoleillée. À une distance de 200 verges (183 m), il faut une intensité de 400-500 cd (cité par Cole et Brown, 1966).
- *Cole et Brown (1966)* : Les protanopes ont besoin d'une luminance environ 4 fois celle requise pour les conducteurs normaux, ce qui correspond à une intensité d'au moins 600 cd pour un feu de 8 po.
- *Hulscher (1975)* : Un feu rouge doit avoir une intensité de crête de 895 cd pour être perçu à une distance de 240 m sans écran de visibilité. À l'aide de calculs analytiques basés sur les travaux de Cole, Hulscher a également montré qu'un feu de 12 po sans écran de visibilité n'exige qu'une intensité correspondant à une réduction d'un tiers (vitesse de 100 km/h, luminance de fond de ciel de 10 000 cd/m^2, distance de 240 m), ce qui abaisse l'intensité lumineuse requise de 895 à 600 cd.
- *Fisher et Cole (1974)* : Sur une route à circulation rapide, *la baisse d'intensité possible n'est que de 11 %* (de 895 à 800 cd) en raison de l'effet utile plus faible de l'écran de visibilité aux distances plus grandes.
- *Corbin* et al. *(1995)* : L'intensité requise pour un feu à disque de diodes électroluminescentes rouges semble être dans la gamme 300-500 cd avec une distribution étroite (angle de visibilité de 7°). On peut réduire d'environ 26 à 52 % l'intensité requise pour les feux à disque de diodes en doublant l'angle de distribution.
- *Janoff (1990)* : En combinant l'utilisation d'un écran de visibilité (comme approche prudente) avec un facteur de dépréciation de 30 %, on obtient une intensité de crête dans le rouge de 1 060 cd (895 cd x 0,89 x 1,33) pour les feux neufs de 12 po, le facteur 0,89 correspondant à une réduction de 11 % due à l'écran de visibilité.
- *Pezoldt* et al. *(1997* : L'intensité lumineuse doit être de 860 cd au moins dans l'axe optique principal du réseau de diodes électroluminescentes à une distance de 50 pi (12,7 m).
- *Sullivan* et al. *(1997)* : L'intensité de crête désirable calculée pour apercevoir le feu à une distance de 240 m est de 541 cd.
- *Staplin* et al. *(1997)* ont demandé des normes plus sévères que les normes actuelles de l'ITE dans une vaste étude des besoins des conducteurs âgés. Ils ne présentent pas de travaux originaux, mais passent en revue la littérature pour évaluer l'information sur les conducteurs âgés. Les deux caractéristiques qu'ils examinent en ce qui concerne la modification des exigences quant à l'intensité de crête sont les défaillances dans la perception des couleurs et l'âge des conducteurs. Ils citent Cole et Brown (1968) qui ont établi que l'intensité optimale des feux rouges est de 200 cd à une luminance de fond de ciel de 10 000 cd/m^2 et qu'une intensité de 100 cd serait adéquate (l'intensité «optimale»

étant celle pour laquelle le temps de réaction ne dépasse pas de plus de 0,1 seconde le temps de réaction minimal, et une intensité «adéquate» étant une intensité pour laquelle le feu sera probablement aperçu même si le temps de réaction est plus long). Environ 2 % des individus de sexe masculin ont une faiblesse dans la sensibilité au rouge. D'après Cole et Brown (1966), l'intensité optimale des feux rouges pour ces conducteurs daltoniens est supérieure à 600 cd (plus de trois fois l'intensité optimale pour les individus à perception normale des couleurs) et est d'environ 720 cd d'après Fisher (1969). Utilisant des données publiées par Blackwell (1970), Fisher et Cole (1974) signalent que les conducteurs ont besoin d'une intensité 1,5 fois plus grand à 50 ans et trois fois plus grande à 70 ans. Ils font observer que, bien que les conducteurs âgés puissent percevoir les feux quand l'intensité est plus grande, leur temps de réaction est plus long que celui des conducteurs jeunes.

- *NCHRP (2001) 5-15 Project* : La plus récente étude sur les exigences concernant l'intensité des feux de circulation. Ce rapport conclut : «Par conséquent, nous proposons que, pour les situations moins exigeantes (situations plus courantes), une performance correspondant à un niveau environ deux fois moins élevé que celui de nos résultats en laboratoire (c.-à-d., comparable aux niveaux mesurés par Cole et Brown (1968) et Fisher (1971)) serait appropriée [200 cd]. Pour ces situations dans les catégories de vitesse les plus élevées, les intensités devraient suivre les recommandations d'Hulscher [600 cd avec écran de visibilité]».
- *Staplin* et al. *(1997)* conclut : «La plupart de ces travaux sont analytiques; il y a eu très peu d'études empiriques. Les quelques études empiriques effectuées sont soit des études en laboratoire, soit des études effectuées avec des techniques d'étude sur le terrain utilisées avec des méthodes qui en limitent la généralisation», et «Pour placer cette discussion dans son contexte, on remarquera que les recommandations sur les tailles, les couleurs et les exigences en service concernant les feux de circulation ont dans une grande partie été dérivées analytiquement d'une étude de Cole et Brown (1966)»

6.2 Conclusions sur les exigences pour les conducteurs

D'après les algorithmes de calcul de l'intensité lumineuse nécessaire pour obtenir une portée diurne de 1 500 pi, il faut une intensité minimale de 100 cd et une intensité «de crête optimale» de 4 000 cd. La gamme des intensités lumineuses recommandée est plus étroite dans la littérature scientifique. Si l'on ne tient compte que des recommandations pour les routes à circulation rapide sans prendre en compte les corrections pour la dégradation quand elles sont mentionnées, la littérature scientifique restreint les intensités recommandées en les fixant entre 300 et 800 cd. Au-delà de 800 cd, elle conclut que la luminosité des feux de signalisation pourrait être excessive la nuit (voir la section 5.11).

Afin de réduire davantage la gamme des intensités lumineuses requises pour les feux à diodes électroluminescentes, nous avons effectué une série d'expériences sur le terrain et en laboratoire conçues pour obtenir des informations qui aideraient à déterminer une intensité lumineuse requise entre 300 et 800 cd.

7. EXPÉRIENCES SUR LE TERRAIN ET EN LABORATOIRE

Afin d'obtenir des informations sur la performance réelle des modules de signalisation à diodes électroluminescentes, nous nous sommes procurés chez divers fabricants des échantillons et des prototypes à caractéristiques lumineuses diverses. Les intensités lumineuses et les diagrammes de rayonnement de ces modules à diodes ont été déterminés en laboratoire et quatre paires de modules couvrant la gamme 300-800 cd ont été choisies pour une série d'expériences sur le terrain et en laboratoire. À moins d'indications contraires, toutes les intensités lumineuses ont été mesurées à 10,5 V, ce qui est la tension maximale appliquée à un feu de passage à niveau dans des conditions d'utilisation normales. Au Canada, les feux sont réglés pour fonctionner dans la gamme nominale de 9-10 V. Aux États-Unis, la tension minimale peut atteindre 8,5 V. L'effet de la tension sur l'intensité lumineuse des ampoules à incandescence est illustré à la figure 46 de la section 12.1.

Tableau 10 – Caractéristiques photométriques des modules à diodes choisis

TEST		**Paire n° 1**	**Paire n° 2**	**Paire n° 3**	**Paire n° 4**
Description du faisceau		Type ITE	Type ITE	Plus large horizontalement et plus étroit verticalement que le type ITE	Faisceau circulaire
Intensité lumineuse	*Dans l'axe*	636 cd	635 cd	956 cd	374 cd
	5° vers le bas	797 cd	675 cd	190 cd	162 cd
	10° vers le bas	293 cd	362 cd	41 cd	31 cd
	15° vers le bas	133 cd	90 cd	30 cd	12 cd

PAIRE DE MODULES À DIODES N° 1

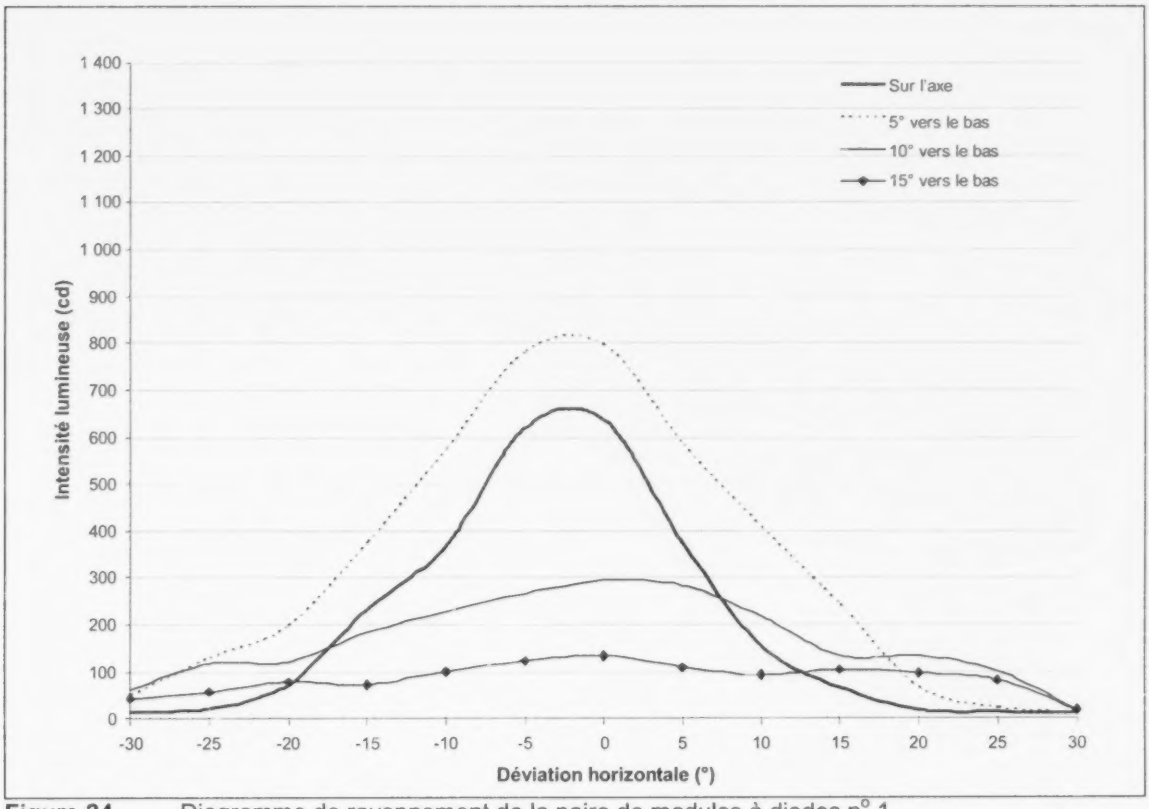


Figure 24 Diagramme de rayonnement de la paire de modules à diodes n° 1

Tableau 11 – Intensité lumineuse mesurée pour la paire à diodes électroluminescentes n° 1

	30 G	*25 G*	*20 G*	*15 G*	*10 G*	*5 G*	*0*	*5 D*	*10 D*	*15 D*	*20 D*	*25 D*	*30 D*
0	14	22	72	232	368	619	636	371	153	65	18	13	12
5 B	50	129	198	376	575	782	797	585	408	243	66	23	12
10 B	61	117	120	182	227	265	293	282	216	132	132	100	17
15 B	42	56	78	72	99	121	133	108	92	103	95	80	18

PAIRE DE MODULES À DIODES N° 2

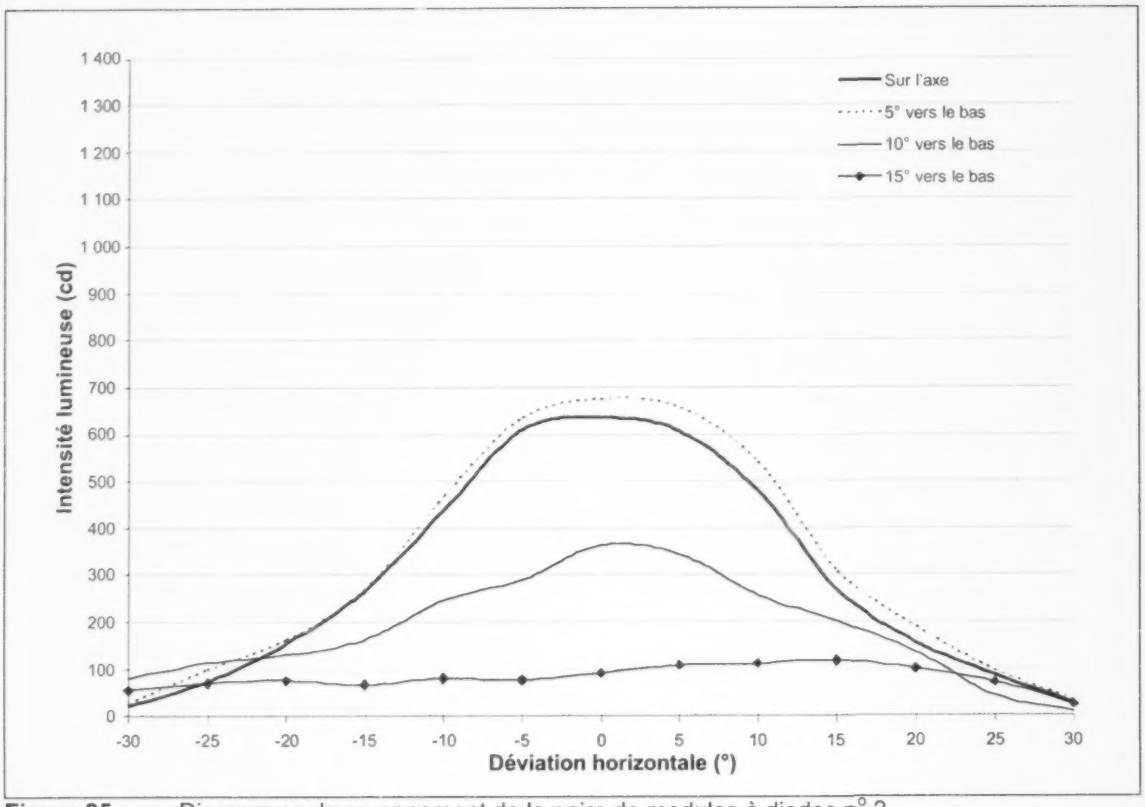


Figure 25 Diagramme de rayonnement de la paire de modules à diodes n° 2

Tableau 12 – Intensité lumineuse mesurée pour la paire à diodes électroluminescentes n° 2

	30 G	*25 G*	*20 G*	*15 G*	*10 G*	*5 G*	*0*	*5 D*	*10 D*	*15 D*	*20 D*	*25 D*	*30 D*
0	21	73	153	266	437	609	635	605	478	267	154	86	26
5 B	26	98	161	267	467	634	675	656	540	307	188	95	32
10 B	79	111	128	161	244	288	362	343	255	199	134	41	9
15 B	54	69	74	65	79	75	90	107	110	116	99	70	22

PAIRE DE MODULES À DIODES N° 3

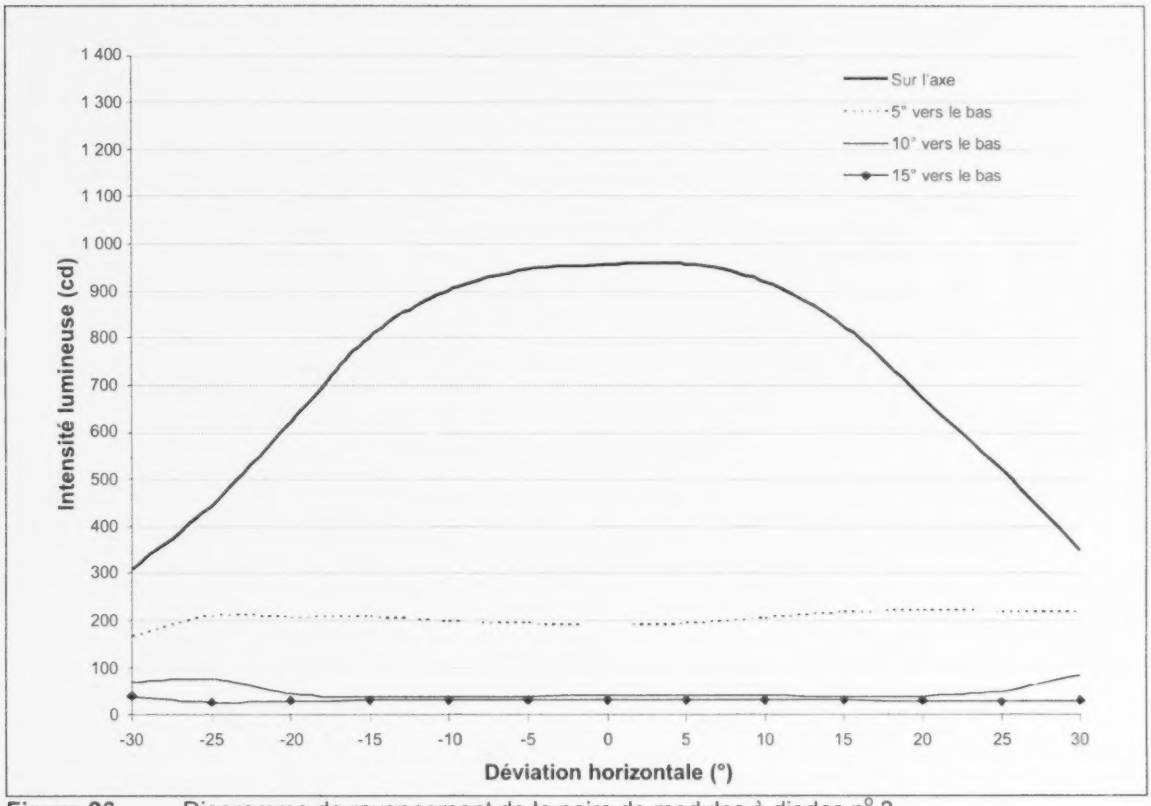


Figure 26 Diagramme de rayonnement de la paire de modules à diodes n° 3

Tableau 13 – Intensité lumineuse mesurée pour la paire à diodes électroluminescentes n° 3

	30 G	*25 G*	*20 G*	*15 G*	*10 G*	*5 G*	*0*	*5 D*	*10 D*	*15 D*	*20 D*	*25 D*	*30 D*
0	308	445	620	802	900	945	956	958	920	826	674	520	349
5 B	166	210	207	208	199	194	190	194	206	218	222	220	217
10 B	69	75	44	38	39	40	41	41	41	39	40	50	83
15 B	39	26	29	30	31	30	30	30	30	30	29	27	29

PAIRE DE MODULES À DIODES N° 4

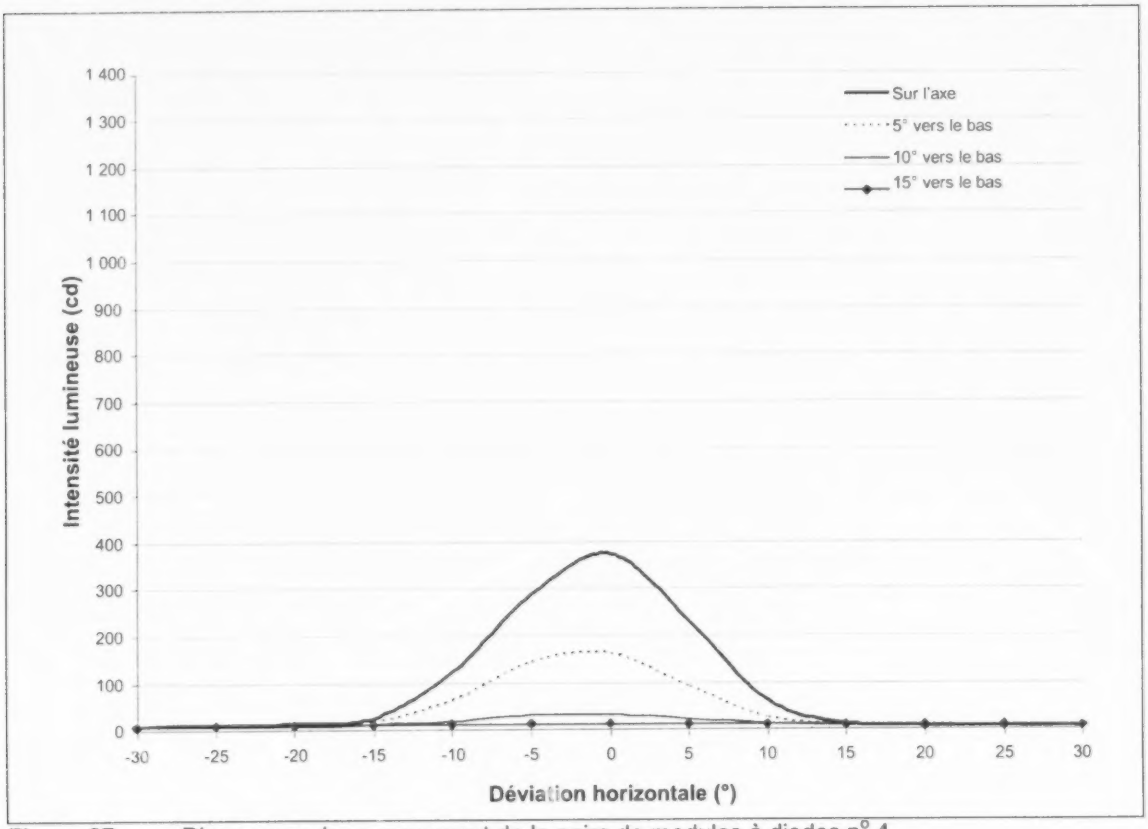


Figure 27 Diagramme de rayonnement de la paire de modules à diodes n° 4

Tableau 14 – Intensité lumineuse mesurée pour la paire à diodes électroluminescentes n° 4

	30 G	*25 G*	*20 G*	*15 G*	*10 G*	*5 G*	*0*	*5 D*	*10 D*	*15 D*	*20 D*	*25 D*	*30 D*
0	9	11	14	26	122	287	374	231	61	13	9	8	7
5 B	8	10	12	20	64	145	162	92	26	11	9	8	7
10 B	8	9	10	13	18	30	31	22	13	10	9	8	7
15 B	7	9	9	10	11	12	12	11	10	9	8	8	7

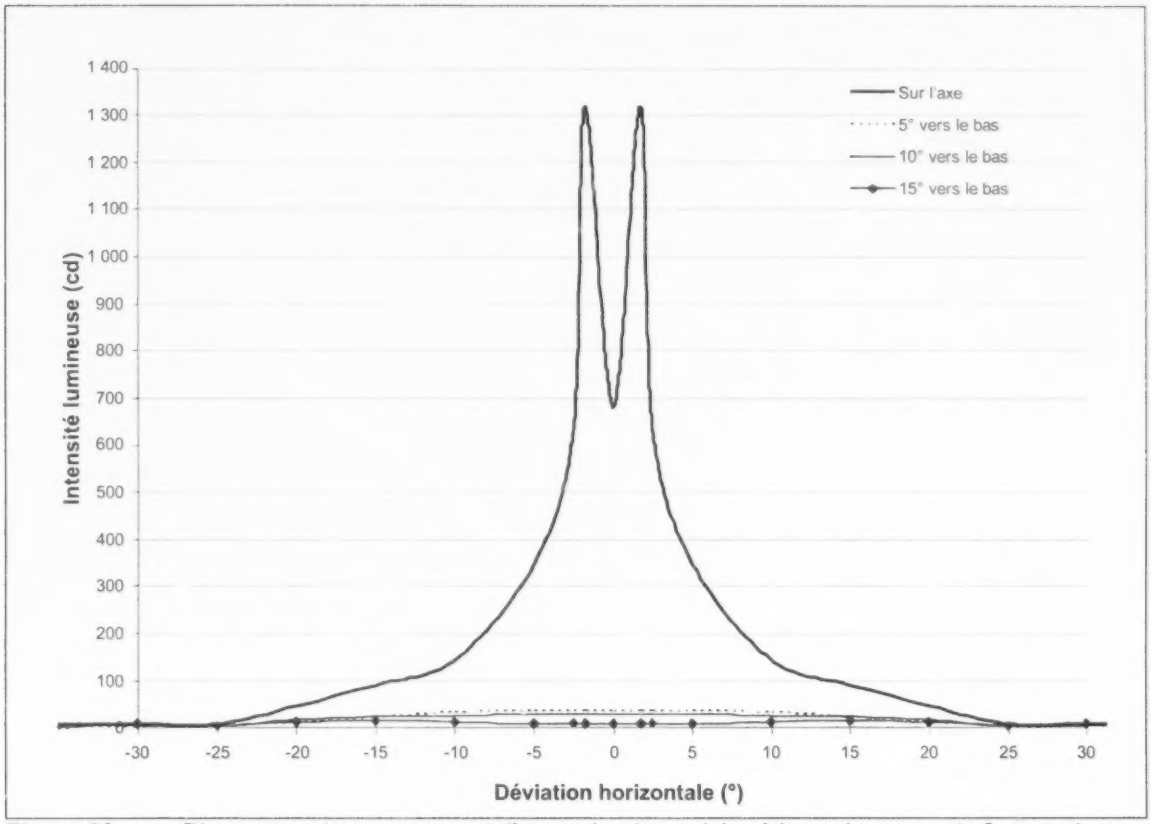


Figure 28 Diagramme de rayonnement d'une paire de modules à incandescence de 8 po anciens et hors service (oculaire 30-15°, ampoule de 18 W, test à 10,5 V)

Tableau 15 – Intensité lumineuse mesurée sur la paire de modules à incandescence de 8 po anciens

	35 G	*30 G*	*25 G*	*20 G*	*15 G*	*10 G*	*5 G*	*2,5 G*	*1,75 G*	*0*	*1,75 D*	*2,5 D*	*5 D*	*10 D*	*15 D*	*20 D*	*25 D*	*30 D*	*35 D*
0	9	7	8	46	90	144	347	638	1 320	679	1 320	638	347	144	90	46	8	7	9
5 B	0	5	5	12	23	34	37	37	37	37	37	37	37	34	23	12	5	5	0
10 B	0	6	3	16	23	25	28	28	28	28	28	28	28	25	23	16	3	6	0
15 B	0	8	4	12	14	12	8	9	8	8	8	9	8	12	14	12	4	8	0

7.1 Expérience sur le terrain n° 1

La première expérience a été conçue et réalisée en vue de répondre aux questions suivantes :

1) Les modules de signalisation à diodes électroluminescentes à faisceau large et à intensité lumineuse entre 300 et 800 cd sont-ils plus lumineux et plus efficaces que les feux à incandescence standard?
2) Les modules à diodes sont-ils visibles à la distance de 1 500 pi spécifiée par l'AREMA pour une journée ensoleillée?
3) Le diagramme de rayonnement est-il assez large pour les oculaires 30-15°, 20-32° et 70° utilisés avec les feux à incandescence?

4) Les modules à diodes sont-ils trop lumineux la nuit?

Les participants présents à la réunion du Comité directeur tenue les 24 et 25 septembre 2001 ont évalué les quatre paires de feux à diodes de passage à niveau et une paire de feux à incandescence usagés de 8 po.

7.1.1 Méthodologie

Les modules de signalisation ont été testés au champ de tir Heal du ministère de la Défense nationale. Cette installation permettait à un groupe échantillon d'évaluer rigoureusement la performance des feux. Ce champ comporte 24 couloirs de tir avec des bermes de tir espacées de 100 verges jusqu'à 600 verges; au-delà, les espacements entre les bermes sont de 200 verges. Le champ mesure 1 200 verges de longueur sur 100 verges de largeur (figure 29). Au point de départ de chaque couloir est inscrit le numéro de la cible correspondante qui est installée sur une berme d'une hauteur de 20 pi par rapport au point d'observation. Chaque cible a une largeur de 1,55 m et l'espacement entre les cibles est de 2,75 m (figure 30). Les feux étaient montés en paires, une paire devant chaque cible.

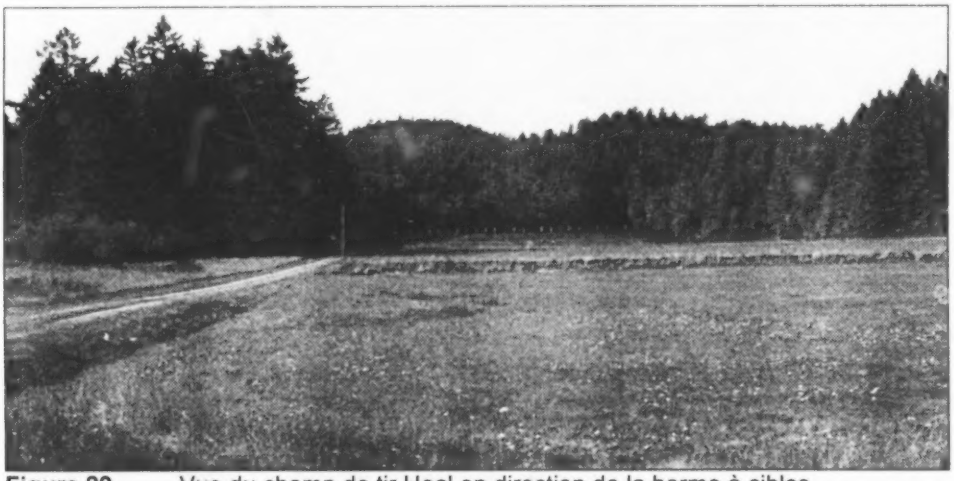


Figure 29 Vue du champ de tir Heal en direction de la berme à cibles

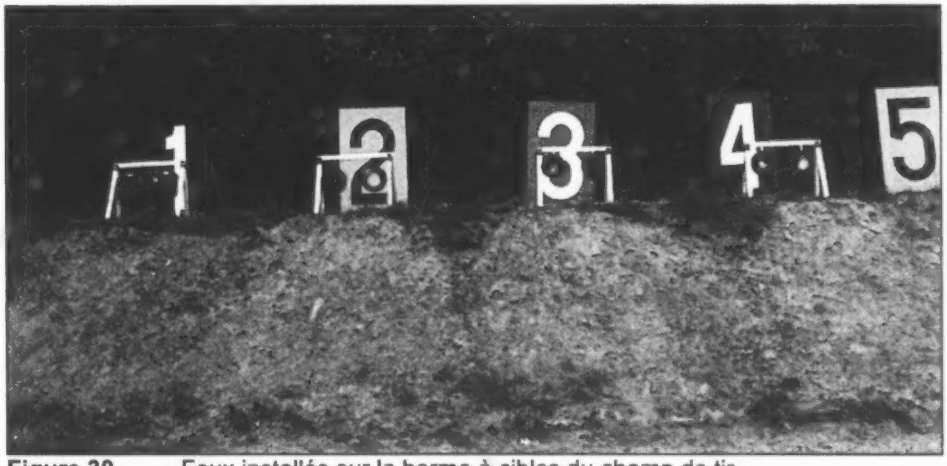


Figure 30 Feux installés sur la berme à cibles du champ de tir

Les feux étaient montés par paires sur des chevalets individuels avec un espacement de 31 po entre les feux de chaque paire (ce qui est l'espacement normal en service). Les figures 31 et 32 montrent les installations de test.

Figure 31 Vue de côté de l'installation de test des feux

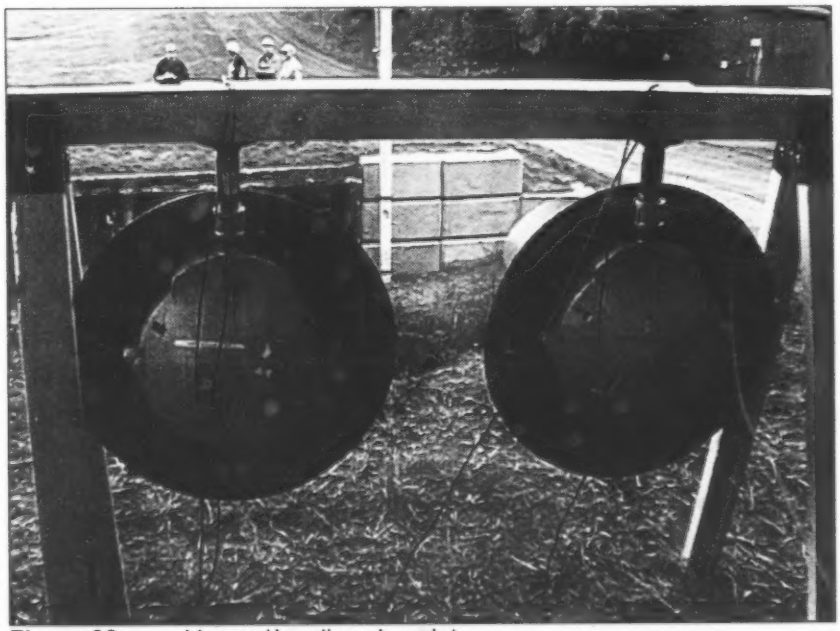


Figure 32 Vue arrière d'un chevalet

Les paires de feux étaient espacées de façon uniforme et montées comme suit devant les cibles des couloirs numérotés :

- Couloir 1 – Feux à diodes n° 1
- Couloir 2 – Feux à diodes n° 2
- Couloir 3 – Feux à incandescence de 8 po
- Couloir 4 – Feux à diodes n° 3
- Couloir 5 – Feux à diodes n° 4

Les cinq paires de feux étaient connectées à un commutateur-clignoteur Union. Deux batteries de 12 V étaient utilisées pour alimenter le clignoteur et les cinq paires de feux. Les deux batteries étaient chargées par un chargeur de batterie de 12 V afin de maintenir la tension appropriée durant l'expérience. Le chargeur de batterie était alimenté par un générateur. L'une des batteries était connectée par l'intermédiaire d'une résistance chutrice de façon à fournir une tension de 10,5 V au clignoteur et à trois paires de feux, les paires de diodes n^{os} 3 et 4 et la paire de feux à incandescence de 8 po. Les deux autres paires, les paires de diodes n° 1 et n° 2, étaient alimentées à une tension de 12 V par la seconde batterie. La même fréquence de clignotement était utilisée pour les cinq paires de feux.

Les feux à incandescence utilisés dans cette expérience avaient été mis hors service par la compagnie E&N Railway et se trouvaient dans deux vieux boîtiers d'acier GRS. Des ampoules GE de 18 W ont été utilisées. Les lentilles et les miroirs ont été nettoyés avant l'expérience. Tous les feux ont été alignés au moyen d'un niveau pour s'assurer qu'ils étaient verticaux, et orientés dans la direction du champ de tir.

7.1.2 Protocole d'évaluation

L'expérience sur le terrain a commencé à 14 h le 24 septembre 2001. La journée était ensoleillée et l'éclairement était de 50 000-60 000 lux. Un groupe de onze évaluateurs a commencé à la berme située à 1 000 verges des feux et a ensuite avancé jusqu'à la berme située à 800 verges en évaluant les feux directement dans l'axe et en notant les résultats des observations. À la berme distante de 600 verges, le groupe s'est divisé en deux, l'un des sous-groupes allant à chacun des sites mentionnés au tableau 16. À la berme distante de 50 pieds, les deux groupes ont observé tous les feux en se plaçant dans les couloirs 3, 7 et 10. Toutes les évaluations étaient terminées à 16 h.

Tableau 16 – Liste des points d'évaluation dans l'expérience sur le terrain n° 1

Couloir	**3**	**7**	**12**	**24**	
	Angle horizontal (°)				Angle vertical (°)
Berme de 50 pi, en dessous	0	15			18
Berme de 50 pi	0	15	30		8
Berme de 100 verges	0		19	37	3,5
Berme de 200 verges	0			24	1,6
Berme de 300 verges	0			15	1,1
Berme de 400 verges	0			12	1,0
Berme de 500 verges	0			8	0,8
Berme de 600 verges	0			6	0,7

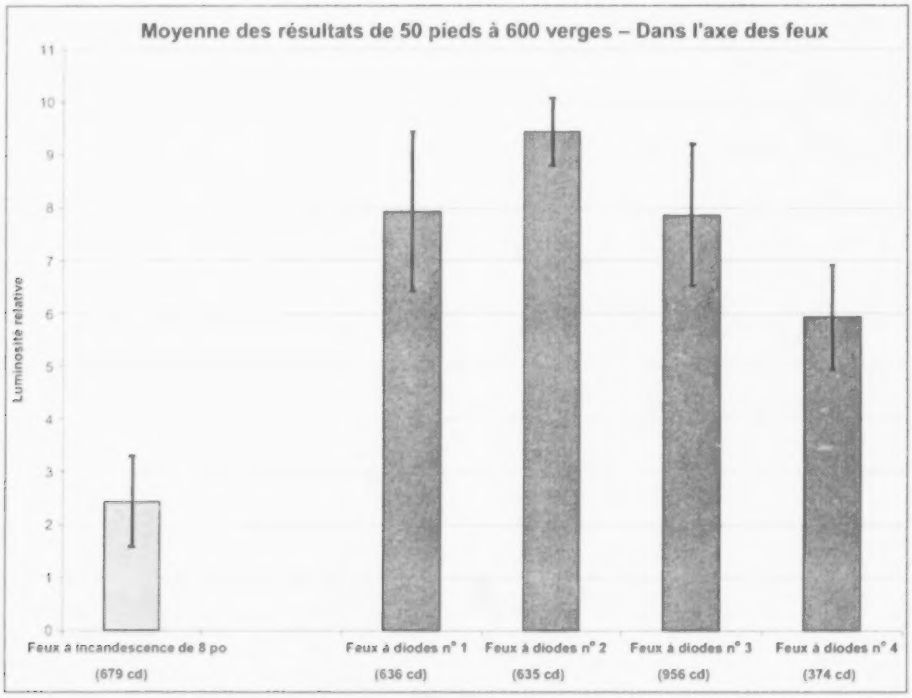
Figure 33 Le groupe échantillon observant les feux

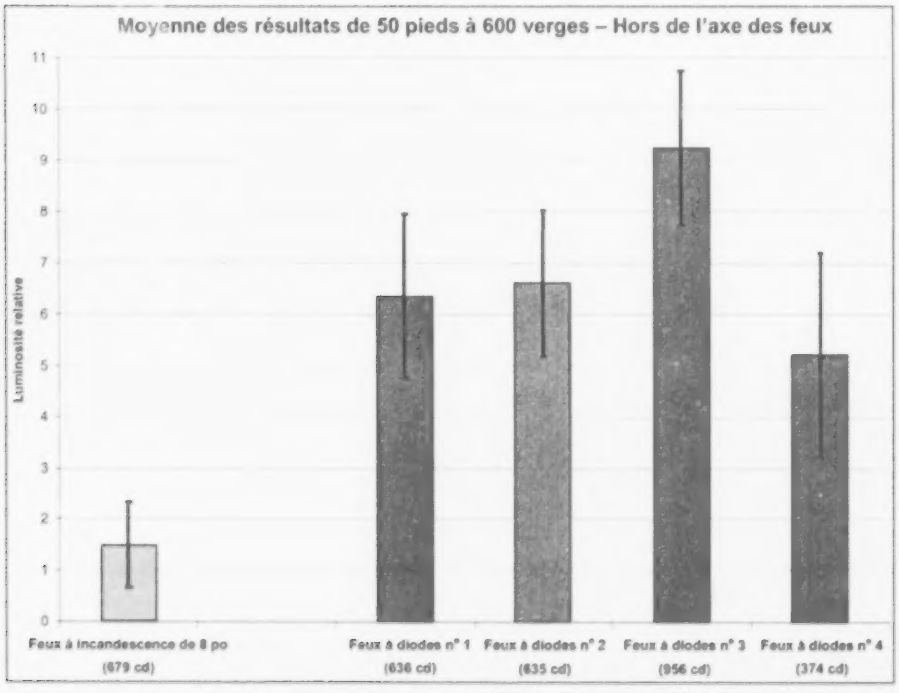
Six évaluateurs sont retournés au champ de tir à 21 h 30 pour observer les feux la nuit. Les évaluations ont été effectuées entre la berme située à 1 000 verges et celle située à 50 pieds des feux.

Les feux ont été évalués sur une échelle allant de 0 à 10 dans les expériences diurnes et nocturnes. La note 10 signifie que le feu était le plus perceptible à la position donnée. Les autres feux étaient cotés comparativement au feu le plus perceptible. La cote 0 signifie que le feu n'était pas visible et la cote 5, que sa luminosité n'était que la moitié de celle du feu le plus perceptible.

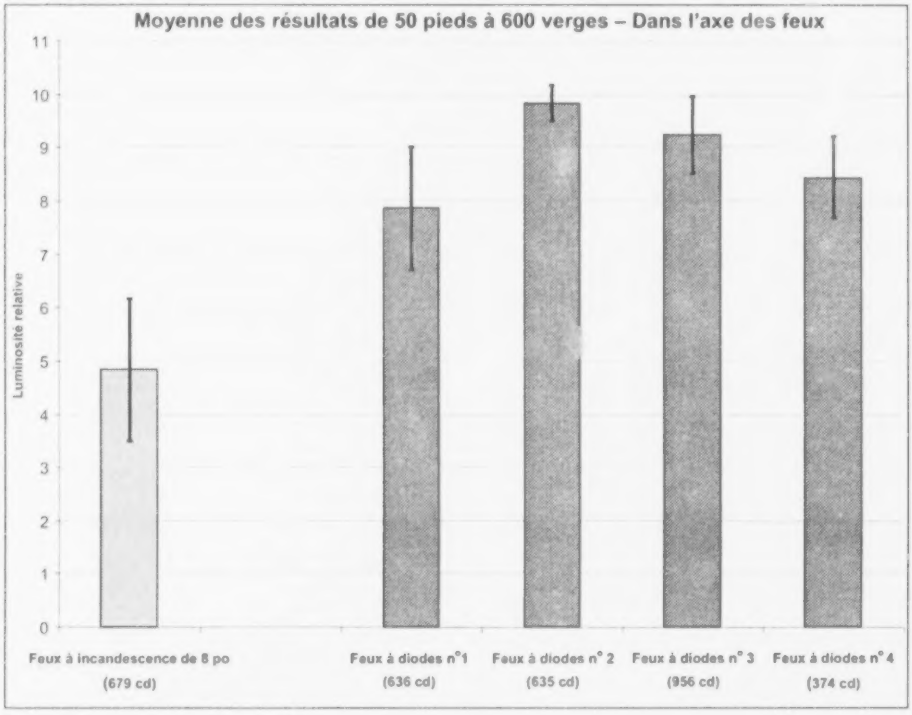
7.1.3 Résultats de l'expérience sur le terrain n° 1

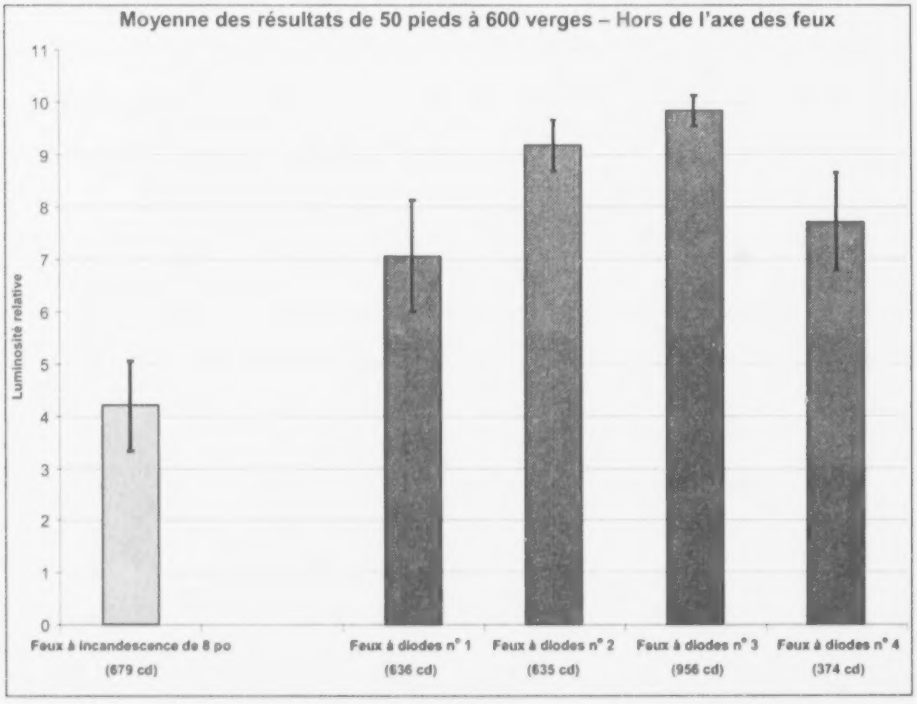
EXPÉRIENCE DIURNE





EXPÉRIENCE NOCTURNE





7.1.4 Conclusions – Expérience sur le terrain n° 1

Tous les feux à diodes avaient une performance nettement supérieure à celle des anciens feux à incandescence de 8 po.

La meilleure performance des feux à diodes par rapport aux feux à incandescence était plus apparente le jour que la nuit.

Tous les feux étaient nettement visibles à la distance de 1 500 pieds spécifiés par l'AREMA.

Parmi les feux à diodes testés, les paires n^{os} 1, 2 et 3 avaient un faisceau suffisamment large pour toutes les lentilles.

Les feux de la paire n° 4 avaient un faisceau circulaire (aucune lentille secondaire) et cette paire était inadéquate aux grands angles d'observation horizontaux.

Les paires n^{os} 1 et 2 avaient une très grande luminosité la nuit, mais non au point d'être jugés inappropriés.

Le Comité directeur a jugé que l'expérience devrait être répétée avec de nouveaux feux à incandescence de 8 et de 12 pouces soigneusement alignés pour que les résultats soient les meilleurs possibles, et que le groupe échantillon devrait comporter un spectre d'âges plus étendu.

7.2 Expérience sur le terrain n° 2

La deuxième expérience avait pour but de répéter les procédures de la première, mais avec de nouveaux feux à incandescence et des procédures d'alignement améliorées, et de déterminer si les feux à diodes restaient supérieurs aux feux à incandescence.

7.2.1 Méthodologie

Les feux à incandescence ont été remplacés par un feu de 8 po et un feu de 12 po, tous les deux d'un type nouveau. Les diagrammes de rayonnement des nouveaux feux à incandescence étaient très supérieurs à ceux des anciens feux de 8 po, comme on le voit dans les résultats des expériences en laboratoire (figure 34).

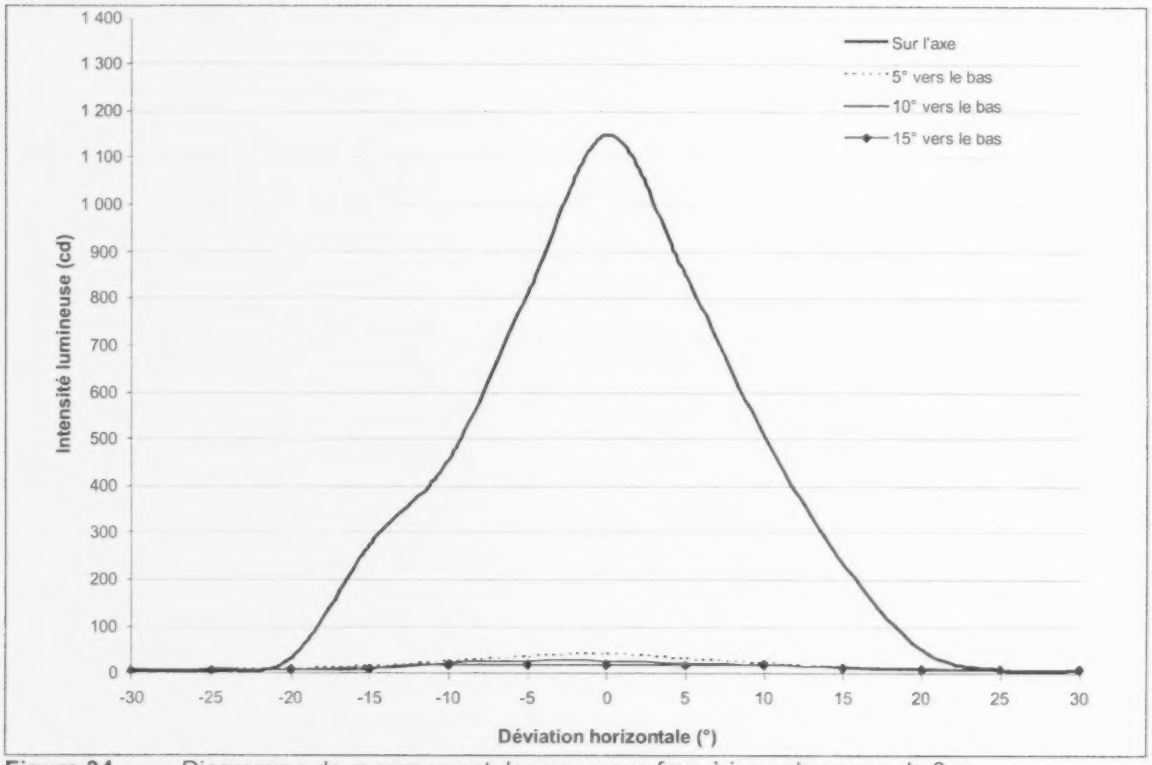


Figure 34 Diagramme de rayonnement des nouveaux feux à incandescence de 8 po (oculaire 30-15°, ampoule de 18 W sous tension de 10,5 V)

Tableau 17 – Intensité lumineuse mesurée pour les nouveaux feux à incandescence de 8 po

	30 G	*25 G*	*20 G*	*15 G*	*10 G*	*5 G*	*0*	*5 D*	*10 D*	*15 D*	*20 D*	*25 D*	*30 D*
0	6	7	31	276	458	813	1 150	847	503	234	50	7	6
5 B	7	7	10	16	26	37	43	32	22	14	9	8	6
10 B	6	7	8	11	21	26	26	21	18	13	10	8	7
15 B	5	5	7	9	18	18	18	17	18	11	8	9	7

L'appareil utilisé pour monter les feux à incandescence a également été modifié de façon à permettre de les installer sur une structure identique à celle utilisée aux passages à niveau afin qu'ils puissent être alignés plus exactement (voir la figure 35). L'alignement des feux a été effectué comme suit : ils ont été allumés en permanence, les lentilles ont été abaissées et les modules ont été tournés de gauche à droite jusqu'à ce que la luminosité soit maximale pour un observateur monté sur la berme située à 300 verges des feux dans le couloir 3. Une fois déterminée la position donnant la plus grande luminosité dans le plan horizontal, le feu a été incliné de haut en bas pour déterminer la direction donnant globalement la plus grande luminosité. Des émetteurs-récepteurs ont été utilisés pour communiquer avec l'observateur monté sur la berme située à 300 verges.

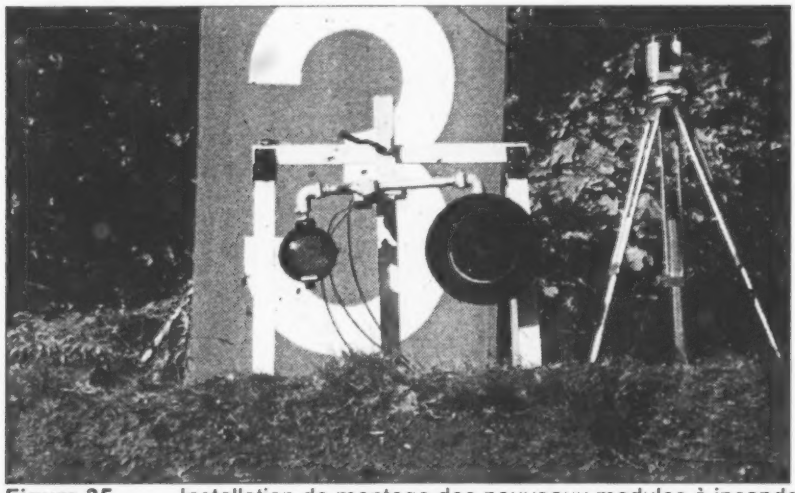


Figure 35 Installation de montage des nouveaux modules à incandescence

Les cinq paires de feux étaient connectées à un commutateur-clignoteur Union. Deux batteries de 12 V étaient utilisées pour alimenter le clignoteur et les cinq paires de feux. L'une des batteries était connectée par l'intermédiaire d'une résistance chutrice de façon à fournir une tension de 10,5 V au clignoteur et à trois paires de feux, les paires de diodes n^{os} 3 et 4 et la paire de feux à incandescence. Les deux autres paires, les paires de diodes n° 1 et n° 2, étaient alimentées sous tension de 12 V par la seconde batterie. La même fréquence de clignotement était utilisée pour tous les feux.

Les feuilles d'évaluation ont été modifiées pour inclure des questions spécifiques sur la luminosité, le clignotement et la couleur des feux de façon que les cotes ne décrivent que la luminosité des feux et aucun autre facteur.

7.2.2 Description du groupe échantillon

L'âge des membres du groupe échantillon variait de 20 à 84 ans. Les tableaux 18 et 19 décrivent les membres des groupes échantillons diurne et nocturne.

Tableau 18 – Description du groupe échantillon diurne

Observateur	1	2	3	4	5	6	7	8
Âge	84	77	53	46	37	29	22	20
Sexe	M	M	M	F	F	F	M	M

Tableau 19 – Description du groupe échantillon nocturne

Observateur	1	2	3	4	5
Âge	53	46	29	22	20
Sexe	M	F	F	M	M

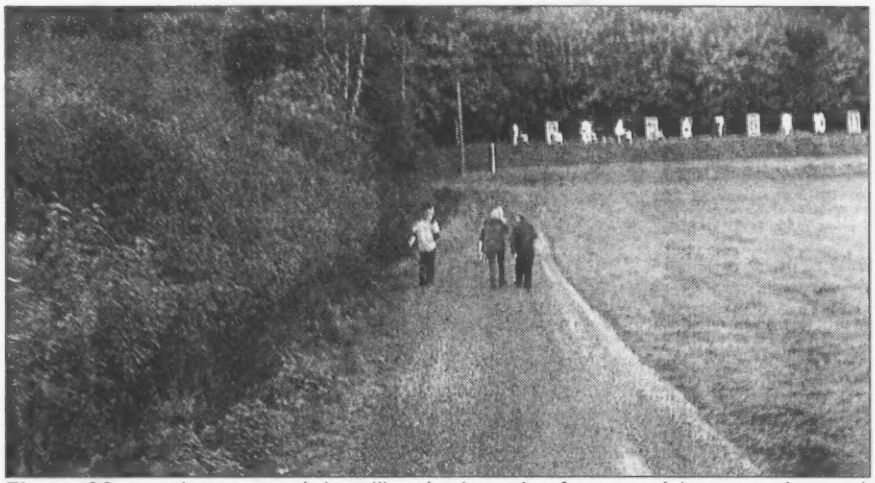


Figure 36 Le groupe échantillon évaluant les feux, expérience sur le terrain n° 2

7.2.3 Protocole d'évaluation

La deuxième expérience sur le terrain a eu lieu le 16 octobre 2001 et a commencé à midi. Quand le ciel était couvert, sa luminance se situait entre 15 000 et 20 000 lux. Quand il était ensoleillé, sa luminance se situait entre 50 000 et 60 000 lux. Le tableau 20 liste les endroits à partir desquels les feux à incandescence ont été observés, avec les angles d'observation.

Tableau 20 – Points d'évaluation pour l'expérience sur le terrain n° 2

Couloir	**3**	**7**	**12**	**24**	
	Angle horizontal (°)				Angle vertical (°)
Berme de 50 pi, en dessous	0	15			18
Berme de 50 pi	0	15	30		8
Berme de 100 verges	0		19		3,5
Berme de 200 verges	0		10	24	1,6
Berme de 300 verges	0		6	15	1,1
Berme de 400 verges	0			12	1,0
Berme de 500 verges	0			8	0,8
Berme de 600 verges	0			6	0,7

Toutes les observations étaient terminées à 14 h.

Cinq évaluateurs du groupe échantillon d'origine sont retournés au champ de tir Heal à 20 h pour évaluer les feux la nuit. Les évaluations ont été effectuées aux mêmes endroits que les observations diurnes. À la berme située à 50 pi des feux, on a soigneusement examiné si la luminosité était trop grande sur la berme même et devant celle-ci. Les observations diurnes se sont terminées à 22 h.

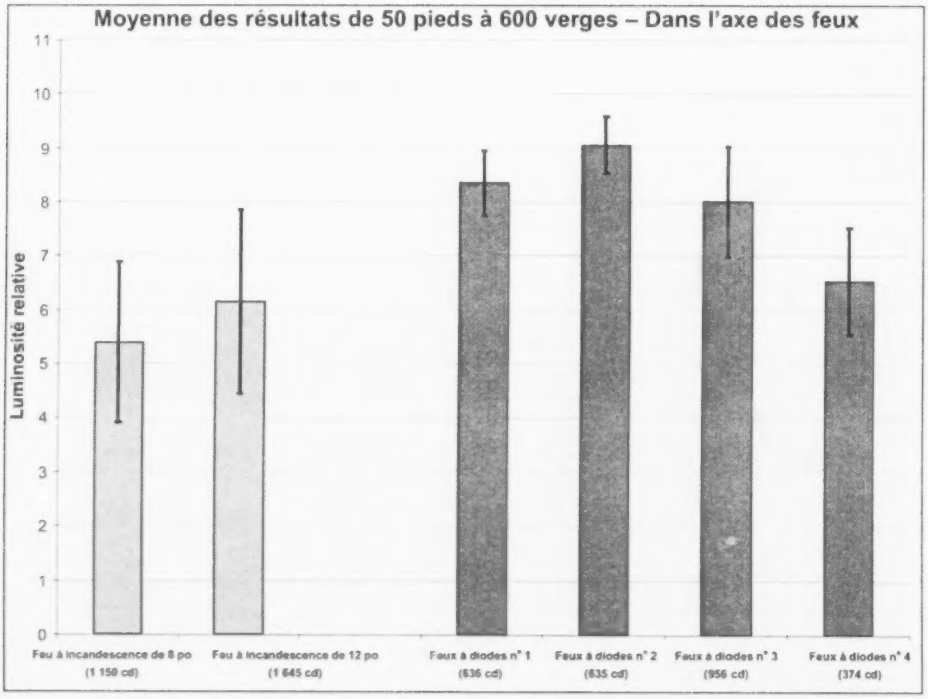
Les feux ont été évalués avec l'échelle utilisée dans l'expérience sur le terrain n° 1.

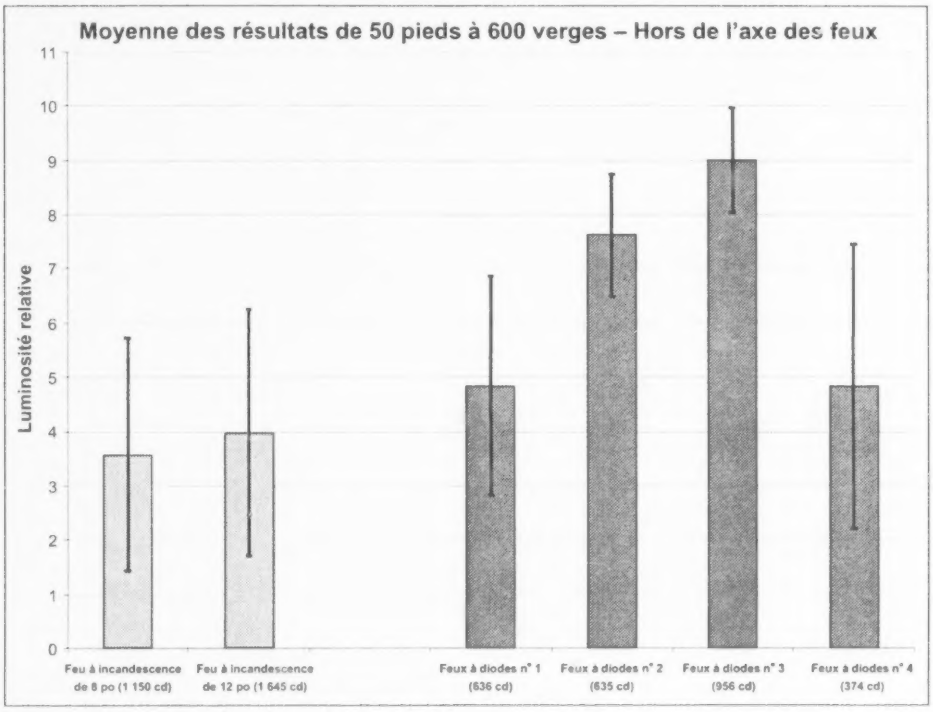
7.2.4 Résultats de l'expérience sur le terrain n° 2

Les tableaux suivants montrent la moyenne et l'écart type des réponses des groupes échantillons par la comparaison des cinq paires de feux.

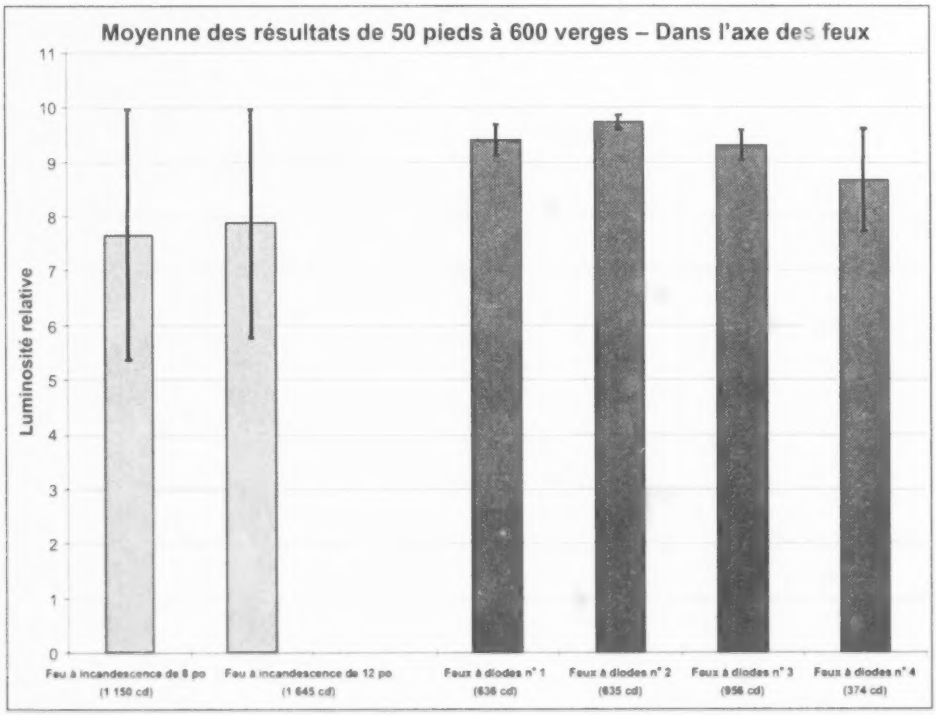
Comparaison des modules de signalisation à diodes avec les nouveaux feux à incandescence

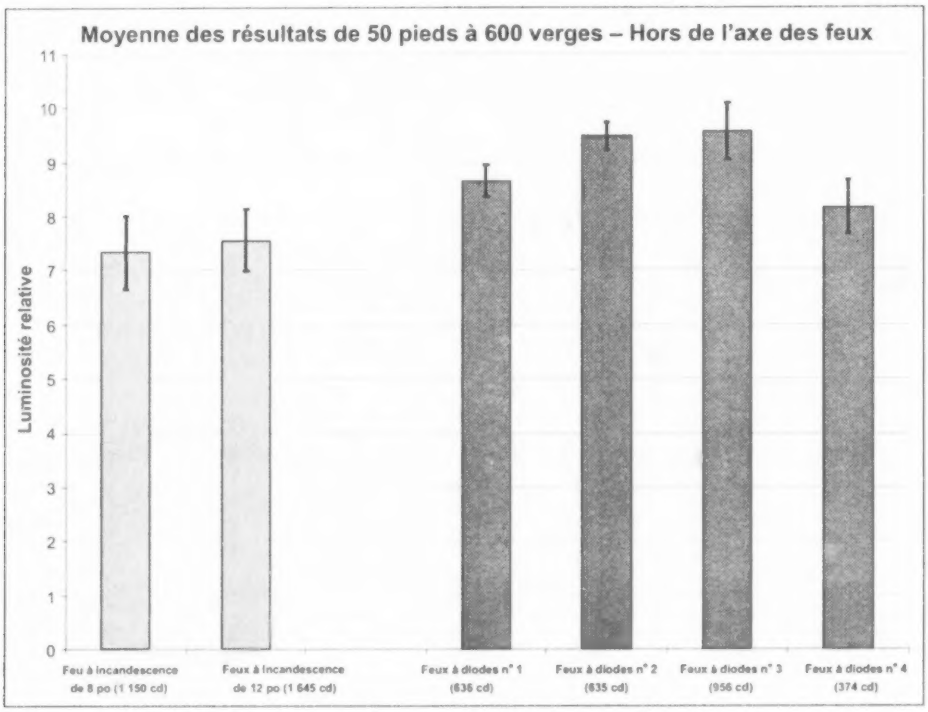
COMPARAISON DIURNE





COMPARAISON NOCTURNE





7.2.5 Conclusions de l'expérience sur le terrain n° 2

Les nouveaux modules à incandescence, qui avaient été alignés plus soigneusement, avaient une meilleure performance comparativement aux modules à diodes électroluminescentes dans cette deuxième expérience. Toutefois, les feux à diodes ont toujours conservé une meilleure performance que les feux à incandescence. Durant le jour, les différences entre les deux technologies sont plus importantes, particulièrement dans les comparaisons angulaires. La nuit, les divers feux semblent avoir à peu près tous la même intensité, bien que les feux à diodes continuent d'être toujours mieux cotés que les feux à incandescence.

La paire de feux à diodes n° 4, qui n'a pas de lentille secondaire et utilise un faisceau circulaire, n'a pas été jugée satisfaisante. Le problème est évident dans les observations diurnes sous un certain angle. L'écart type est considérable à cause des résultats médiocres à certains des grands angles d'observation. On a décidé de ne pas utiliser ces feux dans l'expérience sur le terrain suivant, car le diagramme de rayonnement n'est pas suffisamment large pour satisfaire aux exigences requises du faisceau universel.

Pour ce qui est de la luminosité nocturne, la luminosité des paires de diodes n° 1 et n° 2 a été jugée un peu trop grande à une distance de 50 pieds, mais acceptable quand même.

7.3 Expérience sur le terrain n° 3

Le faisceau de rayonnement circulaire ayant été éliminé dans les deux premières expériences sur le terrain, l'expérience n° 3 a été conçue pour restreindre davantage les exigences concernant le diagramme de rayonnement et l'intensité lumineuse recommandés. La luminosité des feux les plus lumineux étant presque trop grande la nuit, la gamme des intensités a été

réduite à la gamme 400-600 cd. Deux des types de feux avaient des diagrammes de rayonnement semblables à ceux des feux de circulation (les paires de feux à diodes n° 1 et n° 2) et un autre (la paire de feux à diodes n° 3) avait un faisceau étroit, mais plus large.

Dans cette expérience, tous les feux ont été alignés de la même façon au moyen d'un dispositif de pointage à laser mis au point par le Canadien National, et les chevalets utilisés pour supporter les feux ont été améliorés afin que l'on puisse orienter chaque tête de feu individuellement sans perturber l'autre. Tous les feux ont été alignés sur la même cible placée à 100 verges des feux.

On a fait appel aux participants à la réunion du Comité directeur tenue les 15 et 16 avril 2002 pour évaluer trois paires de feux de passage à niveau à diodes et deux feux à incandescence d'un type nouveau, l'un de 8 po et l'autre de 12 po, au champ de tir Heal à Victoria (C.-B.). Les feux ont été orientés vers une cible située à 100 m et alignés au moyen du dispositif de pointage.

7.3.1 Méthodologie

La troisième expérience sur le terrain a été une répétition des deux premières avec des modifications visant à améliorer l'alignement des feux, le câblage et les feuilles d'évaluation. On a utilisé des chevalets métalliques neufs pour monter les feux, au lieu des chevalets de bois utilisés dans les deux premières expériences. Ces chevalets métalliques sont plus forts et plus stables et la longueur des pattes peut être ajustée individuellement. Un chevalet a été utilisé pour chaque feu, de sorte que chacun d'eux pouvait être focalisé et ajusté séparément.

L'installation de montage des feux à incandescence a également été renforcée pour améliorer la stabilité et l'alignement des feux (voir la figure 37).

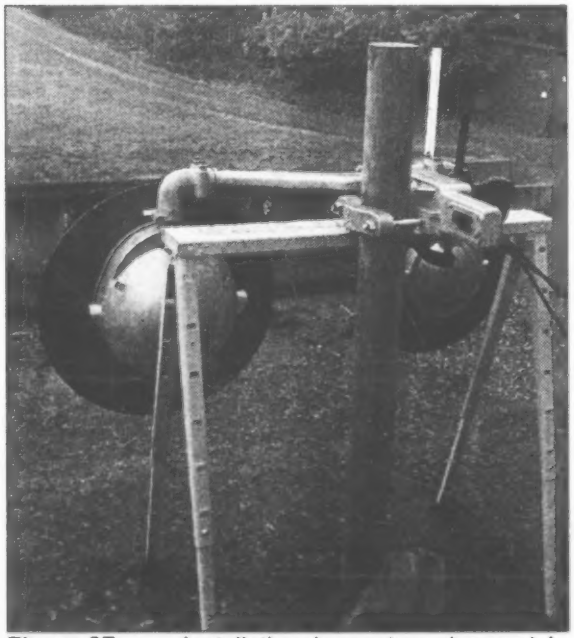


Figure 37 Installation de montage des modules à incandescence

Des feuilles isolantes argentées ont été placées sur les panneaux portant les numéros des couloirs pour servir de surfaces réfléchissantes derrière les feux afin d'obtenir une plus grande luminosité derrière les feux et le même arrière-plan pour tous les feux.

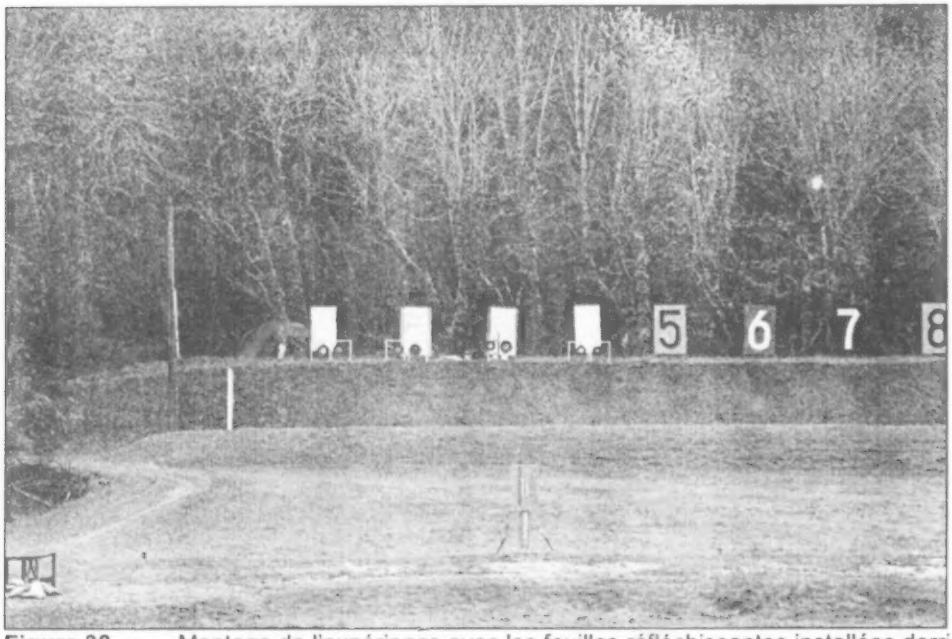


Figure 38 Montage de l'expérience avec les feuilles réfléchissantes installées derrière les feux

Tous les feux ont été alignés à l'aide du dispositif d'alignement à laser du CN. Chaque feu a été orienté vers une cible réfléchissante placée dans le couloir 3 à la berme distante de 100 verges (la cible est visible à la figure 38).

Les paires de feux ont été disposées dans le même ordre que précédemment, sauf qu'il ne restait que trois paires de feux à diodes :

- Couloir 1 – Paire n° 1
- Couloir 2 – Paire n° 2
- Couloir 3 – Feux à incandescence de 8 et 12 po
- Couloir 4 – Paire n° 3

Les feux ont été connectés de façon que l'intensité lumineuse de certaines paires puisse être commutée entre 400 et 600 cd, alors que l'intensité des autres paires restait inchangée.

Les quatre paires de feux ont été connectées à un commutateur-clignoteur Union. Deux alimentations ont été utilisées pour le clignoteur, ce qui permettait de commander indépendamment deux groupes de feux. La même fréquence de clignotement a été utilisée pour tous les feux.

On a demandé au groupe d'évaluation de comparer l'efficacité des huit feux individuels, plutôt que de traiter les feux en paires comme précédemment.

7.3.2 *Protocole d'évaluation*

Un groupe échantillon de 15 évaluateurs a commencé la troisième expérience sur le terrain à 13 h le 15 avril 2002. Il pleuvait assez fortement au début de l'expérience. La pluie s'est ensuite arrêtée, mais le ciel est resté très couvert jusque vers la fin de l'expérience.

L'expérience a été divisée en deux parties, les feux ayant les intensités lumineuses suivantes dans chacune des parties :

Tableau 21 – Intensités lumineuses pour chaque paire de feux

	Paire n° 1		**Paire n° 2**		**Paire n° 3**		**Paire n° 4**	
	Gauche	*Droit*	*Gauche*	*Droit*	*Gauche*	*Droit*	*Gauche*	*Droit*
Partie 1	400 cd	600 cd	400 cd	400 cd	8 pouces	12 pouces	400 cd	600 cd
Partie 2	400 cd	600 cd	600 cd	600 cd	8 pouces	12 pouces	600 cd	400 cd

Le groupe d'évaluateurs a été divisé en 2 sous-groupes de 7 et 8 personnes chacun, un groupe effectuant les évaluations à la moitié des points d'observation pour la partie 1 de l'expérience et à l'autre moitié des points d'observation pour la partie 2, l'autre sous-groupe effectuant les évaluations aux autres points d'observation. Les évaluations ont été terminées à 16 h. Il n'y a pas eu d'observations la nuit, car les expériences précédentes avaient montré que l'intensité lumineuse était un facteur beaucoup moins important la nuit.

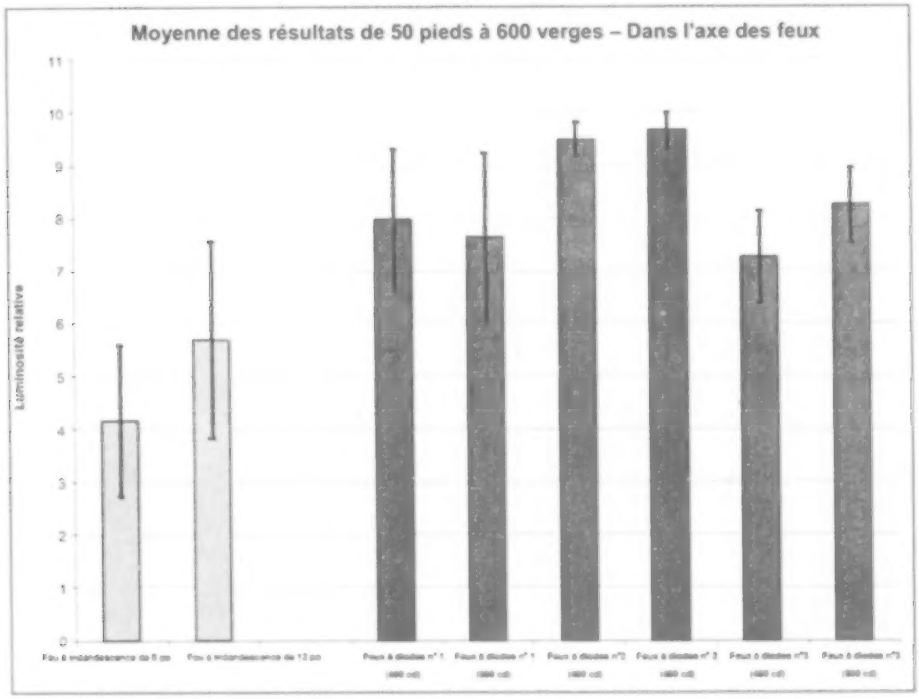
Tableau 22 – Points d'évaluation pour l'expérience sur le terrain n° 3

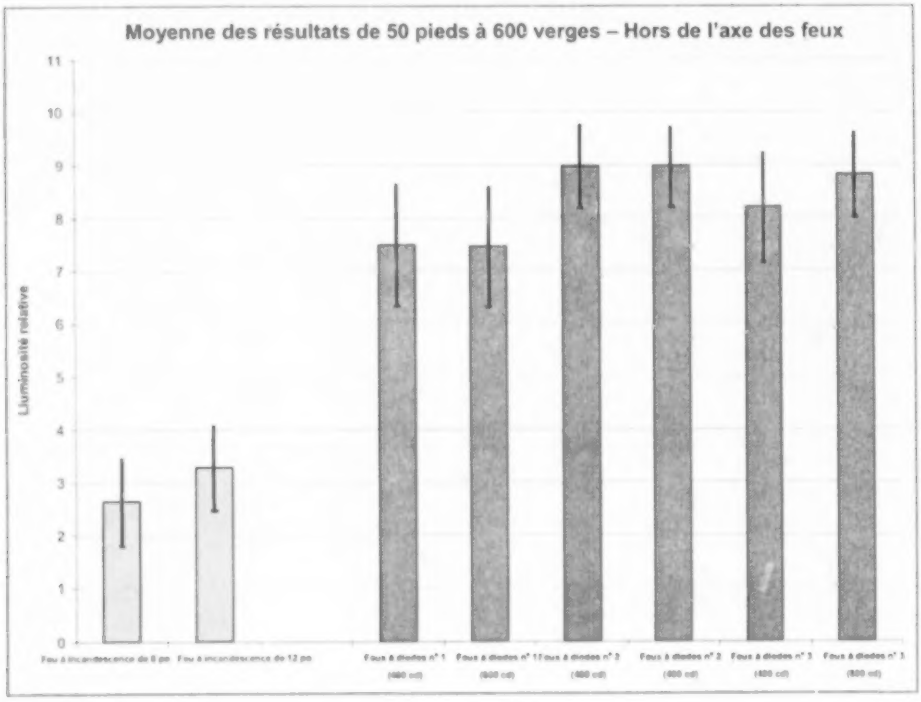
Couloir	**3**	**7**	**12**	**24**	
	Angle horizontal (°)				Angle vertical (°)
Berme de 50 pi, en dessous	0		30		18
Berme de 50 pi	0		30		9
Berme de 100 verges	0		19		3,5
Berme de 200 verges	0			24	1,6
Berme de 300 verges	0			15	1,1
Berme de 400 verges	0			12	1,0
Berme de 500 verges	0			8	0,8
Berme de 600 verges	0			6	0,7

Figure 39 Un sous-groupe échantillon se rend à un autre point d'observation

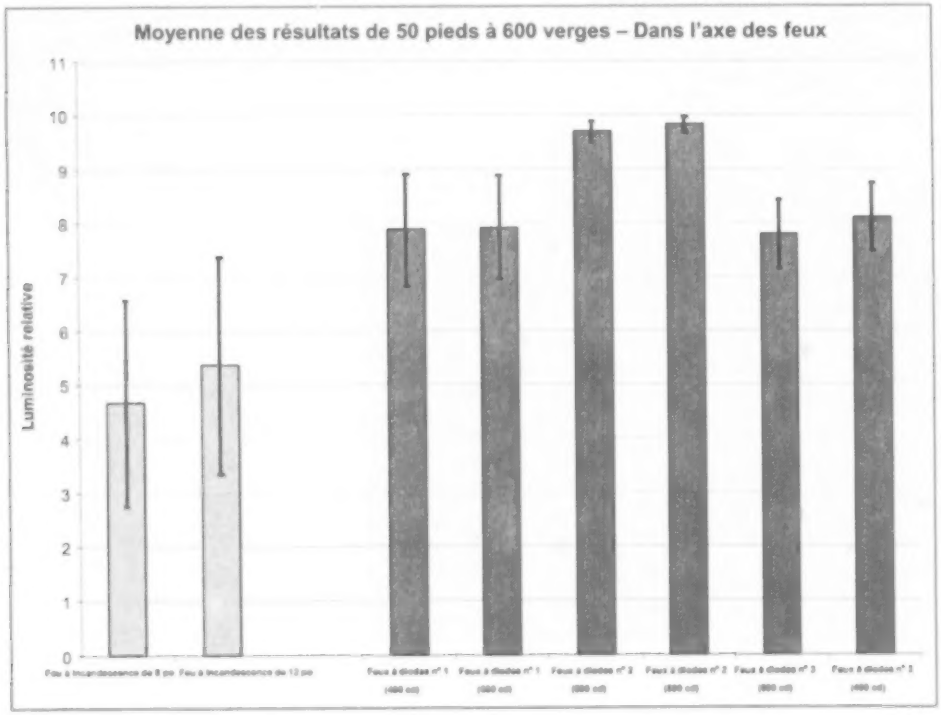
7.3.3 Résultats de l'expérience sur le terrain n° 3

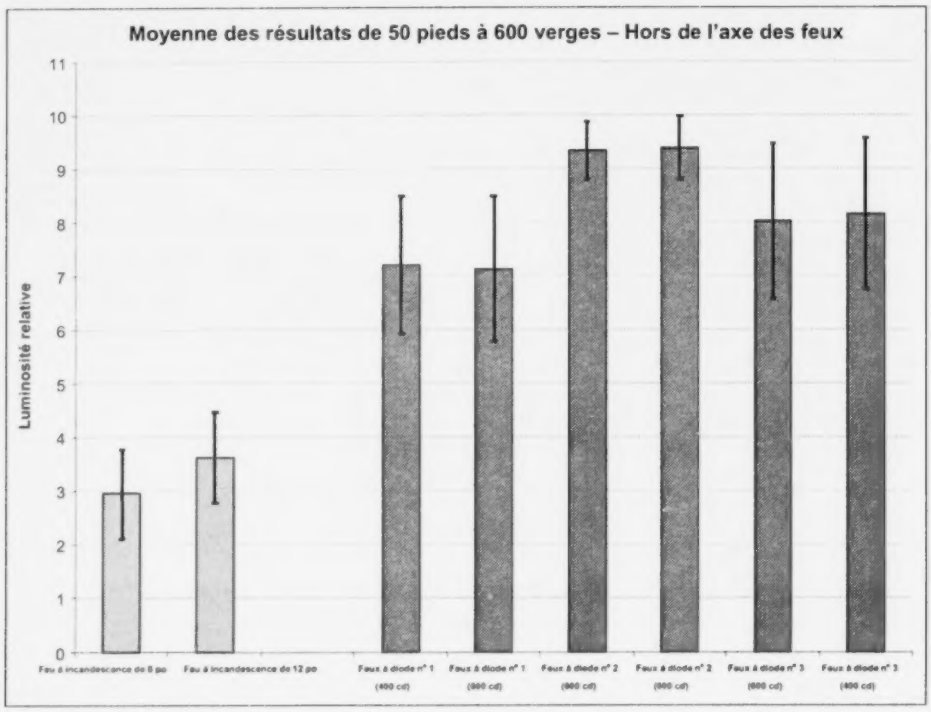
PARTIE 1




Moyenne des résultats de 50 pieds à 600 verges – Hors de l'axe des feux
Luminosité relative
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11

PARTIE 2


Moyenne des résultats de 50 pieds à 600 verges – Dans l'axe des feux
Luminosité relative
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11



7.3.4 Conclusions de l'expérience sur le terrain n° 3

Les résultats montrent à nouveau la nette supériorité des feux à diodes sur les feux à incandescence. Aux intensités de 400 et 600 cd, les feux à diodes ont eu une meilleure performance que les feux à incandescence quand ils étaient observés dans l'axe, et leur étaient très supérieurs quand ils étaient observés sous un certain angle.

La différence de performance entre les intensités de 400 et de 600 cd n'était pas statistiquement significative avec les feux à diodes.

Étant donné que le groupe échantillon ne pouvait faire de distinction sur le terrain entre les intensités lumineuses de 400 et de 600 cd alors que la gamme pour l'intensité lumineuse requise proposée était limitée par ces deux valeurs, on a recommandé une expérience en laboratoire pour déterminer si le groupe échantillon pouvait distinguer ces deux intensités lumineuses dans des conditions contrôlées.

7.4 Comparaison en laboratoire des intensités lumineuses de 400 et 600 cd

On a montré au groupe échantillon un feu de passage à niveau à DEL ayant une intensité lumineuse de 600 cd dans le laboratoire d'optique, qui est une salle noire étroite. On a ensuite demandé au groupe de façon répétée de sortir du laboratoire et d'y retourner pendant que l'on commutait de façon aléatoire l'intensité du module à DEL entre 600 et 400 cd. À chaque visite au laboratoire, on a demandé au groupe si l'intensité était de 600 ou de 400 cd. On a procédé à cinq tests de la sorte; on a de plus procédé à trois tests sans faire sortir le groupe du laboratoire, où on lui a demandé de regarder le sol pendant le réglage de l'intensité lumineuse.

Un score de 50 % aurait correspondu à un choix aléatoire par le groupe échantillon, car il n'y avait que deux réponses possibles sur la feuille de test. Les résultats de cette expérience sont résumés dans le tableau 23.

Tableau 23 – Test de laboratoire : groupe échantillon quittant le laboratoire et y retournant

Numéro du test	Nombre de bonnes réponses	Bonne réponse
Observation préliminaire		600 cd
1	8/14	600 cd
2	10/14	400 cd
3	12/14	400 cd
4	13/14	600 cd
5	11/14	400 cd
6	8/14	400 cd
7	4/14	600 cd
8	10/14	400 cd

7.4.1 Conclusions de la comparaison en laboratoire

Parmi les 112 tests comparant les intensités de 400 et 600 cd, l'intensité a été identifiée correctement dans 78 cas (70 %). Bien que ce score soit au-dessus du score aléatoire de 50 %, il montre que les intensités de 400 et 600 cd sont perçues de façon très semblable par l'œil humain, même dans des conditions très contrôlées. Les résultats montrent que la réponse de l'œil à l'intensité lumineuse est logarithmique, car la différence dans l'intensité lumineuse perçue est d'environ 7 % alors que cette différence serait de 50 % si l'œil avait une réponse linéaire au changement d'intensité lumineuse.

8. RÉTROACTION DES INTERVENANTS

L'un des éléments clés de ce projet a été un effort intensif déployé pour consulter les intervenants en matière de sécurité aux passages à niveau. Ces intervenants étaient des représentants des sociétés de chemins de fer (à plusieurs niveaux), des agents de réglementation canadiens et américains au niveau des provinces, des États et des gouvernements fédéraux en matière de circulation routière et ferroviaire, les fabricants de modules de signalisation à DEL, les distributeurs de feux de passage à niveau, un avocat engagé dans une cause concernant un passage à niveau, et des universitaires avec des intérêts de recherche connexes. On trouvera à l'annexe C la liste des intervenants que nous avons consultés; on trouvera également plusieurs des entrevues de consultation à l'adresse railwaycrossings.com.

Certains des commentaires généraux représentatifs des discussions qui ont eu lieu sont résumés ci-dessous. D'autres rétroactions plus détaillées sur des questions opérationnelles concernant les feux de signalisation ont été incorporées à la norme et/ou à la spécification d'achat.

8.1 Commentaires généraux sur les feux à incandescence

Il est fréquent que les feux à incandescence perdent leur focalisation ou leur alignement, ce qui a des conséquences graves pour la luminosité perçue par les conducteurs. La focalisation et l'alignement sont un problème majeur dans l'entretien des feux de passage à niveau et toutes les personnes consultées ont affirmé que la contribution la plus importante que pourrait apporter la technologie DEL serait d'éliminer les exigences de focalisation et de réduire les exigences d'alignement dans l'entretien des modules de signalisation.

8.2 Commentaires généraux pour l'établissement d'une norme sur les feux à DEL

- Les DEL sont préférables à cause de leurs attributs en matière de couleur.
- Les DEL sont préférables parce qu'elles ont un temps de montée court.
- Après un certain temps sur le terrain, les feux à incandescence étaient toujours désalignés ou défocalisés, ou leur miroir était sale, et ils n'étaient plus conformes à la spécification de 1 600 cd.
- La spécification originale stipulait que le feu doit être visible à une distance de 1 500 pi, mais une intensité de 1 600 cd n'est pas nécessaire pour obtenir cette visibilité.
- De toute façon, la portée de 1 500 pi était trop grande : les feux visaient une portée de 1 000 pi. Il faudrait se baser sur la distance de freinage.
- La spécification était basée sur ce qu'il était possible de faire, et non sur ce qu'il fallait faire.
- La norme sur les feux à incandescence était élevée pour la luminosité dans l'axe, mais le faisceau était très étroit.
- Utilisons la spécification pour les feux de circulation. Avons-nous besoin d'une spécification distincte pour les feux de passage à niveau?
- Il faut être prudent si on utilise la spécification pour les feux de circulation car les passages à niveau sont plus dangereux que les croisements de routes : il n'y a pas de feu d'avertissement ambre, ni de circulation transversale pour signaler qu'il y a un danger.
- Une grande luminosité est préférable : il ne faut pas accepter une luminosité plus faible pour accommoder la norme aux DEL.

Plusieurs principes clés se distinguent dans les commentaires des intervenants :

- Les intervenants sont fortement en faveur d'utiliser un faisceau large avec un abaissement de l'intensité de crête, plutôt que le faisceau étroit avec une zone de grande intensité requis par le passé, du moment que l'intensité lumineuse globale est améliorée.
- Les intervenants sont fortement en faveur d'une norme exigeant que l'intensité lumineuse nominale soit maintenue tout au long de la durée de vie du feu, plutôt que d'une norme établissant une spécification initiale et permettant une certaine dégradation avec le temps.
- Dans une large mesure, les intervenants souhaitaient saisir l'occasion pour uniformiser la norme sur les feux de passage à niveau avec la norme sur les feux de circulation.

Ces principes ont aidé à établir les fondations sur lesquelles la norme sur l'intensité lumineuse a finalement été basée.

9. EXIGENCES PHOTOMÉTRIQUES

Dans le cadre du présent projet, nos travaux ont consisté : à passer en revue les normes courantes régissant la signalisation ferroviaire et routière, à étudier la littérature sur les facteurs humains se rapportant à la perceptibilité des feux à DEL, à calculer l'intensité lumineuse requise pour avertir les conducteurs à la distance de freinage appropriée, à examiner les documents scientifiques abordant les exigences en matière d'intensité lumineuse pour les feux de signalisation, à effectuer une série d'essais en laboratoire et en service réel et à mener de vastes consultations avec les intervenants. Les résultats de tous ces travaux ont servi à établir les exigences photométriques visant les feux de signalisation à DEL.

9.1 Principes/objectifs de l'établissement des exigences photométriques

Les principes et objectifs ci-après ont été établis suite aux consultations avec les intervenants. La norme doit :

- être mesurable et quantifiable, de façon à ce qu'elle soit appliquée pendant la durée de vie totale du feu de signalisation;
- s'attarder aux besoins des conducteurs et aux facteurs humains, et non aux capacités technologiques;
- être confirmée par des essais en laboratoire et en service réel;
- s'appliquer aussi bien aux feux de 8 po qu'aux feux de 12 po;
- s'appliquer aux feux avant, arrière et de voie afin que l'on ait pas à utiliser différents modules de signalisation selon l'emplacement;
- prescrire l'utilisation d'un large faisceau lumineux de sorte qu'il ne soit pas essentiel d'aligner les feux et qu'ils puissent être installés sur les infrastructures des feux de circulation standard;
- énoncer des exigences au moins aussi sévères que celles de l'AREMA concernant présentement la perceptibilité des feux et qui sont contenues dans ses dernières spécifications recommandées;
- être au moins aussi rigoureuse que la norme la plus sévère touchant les feux de signalisation à grand angle pour les trains à grande vitesse.

L'application de ces principes aux résultats des travaux réalisés à ce jour mène aux conclusions suivantes en ce qui concerne les exigences photométriques.

9.2 Examen des normes

Comme on s'entend pour dire que la norme relative à la signalisation aux passage à niveau doit être au moins aussi rigoureuse que la norme la plus sévère touchant les feux de circulation, il est possible d'établir à partir des normes actuelles une intensité lumineuse minimale qui sera acceptable. Les exigences concernant le temps de dégradation des feux de circulation, une fois ces derniers intallés, varient d'une norme à l'autre. À cet égard, la norme nord-américaine est la plus rigoureuse de toutes (intensité lumineuse de 339 cd mesurée hors de l'axe du faisceau). Elle exige que cette intensité soit maintenue pendant la période de garantie de trois ans. Cependant, il n'est fait aucune mention de ce qui pourrait se produire par la suite. La norme européenne, quant à elle, (intensité de 400 cd mesurée dans l'axe du faisceau) prévoit une réduction «nominale» d'intensité après installation, sans toutefois donner la définition du terme

«nominale». La norme australienne est plus sévère (intensité de 600 cd mesurée dans l'axe du faisceau), mais permet une réduction de 25 % de l'intensité après installation.

Partant du principe de l'équivalence aux spécifications les plus rigoureuses pour les feux de circulation, nous concluons que la norme doit exiger qu'une intensité lumineuse minimale soit maintenue à 400 cd pendant toute la durée de vie du module de signalisation.

Ce principe d'équivalence aux normes relatives aux feux de circulation sert également à définir la forme du faisceau lumineux. Tel que mentionné précédemment, les ampoules à incandescence utilisées dans le système ferroviaire traditionnel émettent un mince faisceau, particulièrement dans l'axe vertical. L'oculaire de type 30-15° présente un rapport d'étalement horizontal à vertical de 15:1. L'oculaire de 70° n'étant assorti d'aucune exigence en matière de lumière dans l'axe vertical, le rapport d'étalement est essentiellement infini. Le faisceau lumineux des feux de signalisation étant beaucoup plus large, on peut donc énoncer, à partir des principes susmentionnés, que les spécifications des DEL doivent être au moins équivalentes à celles des feux de signalisation présentant le faisceau le plus large.

9.3 Examen des facteurs humains

Il ressort de l'examen des facteurs humains que les modules de signalisation à DEL sont susceptibles d'être supérieurs aux feux à incandescence en regard de l'intensité lumineuse et ce, en raison de deux avantages inhérents à ces modules :

1) Les signaux à DEL produisent une lumière rouge pure plutôt qu'une lumière blanche filtrée et sont mieux perçus par l'œil humain.
2) Les signaux à DEL peuvent s'allumer et s'éteindre instantanément (en autant que la source d'alimentation des DEL le permette).

Par conséquent, si la norme proposée s'appuie sur la documentation existante et les expériences acquises par l'utilisation de feux à incandescence, on peut s'attendre à ce que les signaux à DEL présentent un degré additionnel de perceptibilité.

L'examen des facteurs humains nous permet également d'établir une limite supérieure d'intensité lumineuse. Des intensités de 1 000 cd et plus, perçues directement la nuit et de près (33 m) peuvent s'avérer trop vives pour les conducteurs. Puisque la portée des feux arrière est souvent établie à 33 m et puisque qu'on propose d'utiliser le même signal pour les feux arrière et avant, il est possible de fixer une limite supérieure à l'intensité lumineuse désirée d'environ 1 000 cd.

9.4 Examen des besoins des conducteurs

L'examen des besoins des conducteurs révèle que, sur les routes à circulation la plus rapide, les conducteurs doivent être avertis de la présence d'un passage à niveau à une distance d'environ 330 m de ce passage. Les algorithmes tirés des documents scientifiques portant sur les intensités lumineuses des feux de circulation, des signaux ferroviaires et des feux de navigation maritime nous permettent de calculer l'intensité des feux de signalisation requise pour respecter cette distance de sécurité. La puissance lumineuse minimale requise à une distance de 330 m est d'environ 100 cd, ce qui est bien inférieur à la limite minimale que nous avons déjà établie et qui n'autorise aucune distraction de la part des conducteurs. L'algorithme associé à la signalisation autoroutière, qui tente d'offrir une marge de manœuvre en cas de

distraction des conducteurs, incite à recommander une intensité lumineuse de 4 000 cd, laquelle est de loin supérieure à la limite tolérable pour la conduite de nuit. Par conséquent, l'examen des besoins des conducteurs ne conclut pas à la réduction de la portée des signaux qui, d'après les points étudiés à ce jour, pourrait varier entre 400 cd et 1 000 cd.

9.5 Examen de la littérature scientifique

L'examen de la littérature scientifique sur l'intensité lumineuse recommandée pour les feux de circulation des routes à circulation rapide a mené à des recommandations de valeurs d'intensité allant de 300 cd à 800 cd. Comme nous avons déjà établi à 400 cd l'intensité minimale requise, il est permis d'affirmer que les résultats affichés dans la littérature scientifique ont pour effet de ramener la limite d'intensité dans une plage se situant entre 400 et 800 cd.

9.6 Examen des essais en service réel

Pour réduire davantage la valeur prescrite dans la norme recommandée, les essais effectués en laboratoire et en service réel ont démontré que les signaux à DEL de 400 cd ayant un faisceau aussi large que celui des feux de circulation routière étaient nettement supérieurs aux nouveaux signaux à incandescence de 8 po (200 mm) et de 12 po (300 mm) soigneusement alignés. Lors des essais en service réel, l'augmentation de l'intensité lumineuse de 400 cd à 600 cd n'a pas produit de résultats statistiquement significatifs. L'augmentation de l'intensité lumineuse prescrite dans la norme jusqu'à 800 cd n'a pas été jugée souhaitable, car cette intensité doit être maintenue pendant la durée de vie des feux. Autrement dit, les fabricants doivent prévoir une intensité supérieure pour contrebalancer la dégradation qui se produit au fil du temps après l'intallation des feux. Pour maintenir un feu à 800 cd, il faudrait prévoir une intensité initiale de 1 000 cd, ce qui serait trop brillant la nuit.

Il ressort des essais en laboratoire et en service réel que l'établissement d'une exigence minimale, rigoureuse, maintenue à 400 cd et prescrivant un large faisceau améliorera considérablement la perceptibilité des feux de signalisation, particulièrement aux angles d'approche des conducteurs.

Les essais en service réel ont démontré que le type de faisceau utilisé dans les feux de circulation est supérieur au faisceau rond.

9.7 Consultation avec les intervenants

Il faut de toute évidence trouver un juste milieu entre le recours à un éclairage puissant à faisceau étroit et l'utilisation d'un faible éclairage à faisceau plus large. Le choix d'un faisceau étroit de haute intensité suppose qu'il faille décider de l'angle d'émission à lui donner et le pointer avec précision. Les ingénieurs en construction de voies ferrées rapportent de nombreux problèmes liés à l'alignement et à la mise au point des faisceaux très étroits. Selon eux, il est préférable de répartir la lumière sur un faisceau plus large et accepter une certaine perte d'intensité. Il importe toutefois de ne pas diminuer la puissance lumineuse totale.

Suivant ce raisonnement, selon lequel les spécifications des DEL doivent permettre d'améliorer la puissance optique produite par les feux à incandescence tout en répartissant cette puissance sur une base plus large – un feu à DEL de 400 cd et à large faisceau, comme les feux de circulation sur les voies rapides en Amérique du Nord (ou les feux de circulation à plus grand

angle qu'on retrouve en Europe), produit une intensité lumineuse d'environ trois fois supérieure à celle d'un feu de signalisation conventionnel à incandescence et à faisceau étroit.

9.8 Exigences photométriques proposées

Les travaux de recherche et d'essai décrits dans le présent rapport nous mènent à recommander une intensité lumineuse minimale de 400 cd, dans l'axe, dans une largeur de faisceau correspondant à celle d'un feu de circulation routière à grand angle installé sur voie rapide, à tous les 5° jusqu'à couvrir un angle de 30° de chaque côté du feu, et de 20° vers le bas.

Voici les exigences photométriques que nous proposons :

«Lorsque des modules de signalisation à DEL sont installés à un passage à niveau routier, ils doivent être, en tout temps et dans toutes les conditions opérationnelles habituelles, conformes aux valeurs d'intensité lumineuse minimale figurant dans le tableau 24 :»

Tableau 24 – Intensité lumineuse minimale (cd) par rapport à la température et à la durée de vie

	30 G	*25 G*	*20 G*	*15 G*	*10 G*	*5 G*	*0*	*5 D*	*10 D*	*15 D*	*20 D*	*25 D*	*30 D*
0	15	40	75	150	250	375	400	375	250	150	75	40	15
5 B	15	40	75	150	250	325	350	325	250	150	75	40	15
10 B	15	35	60	85	110	125	130	125	110	85	60	35	15
15 B	15	20	25	30	35	40	45	40	35	30	25	20	15
20 B	10	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	10

9.9 Comparaison détaillée aux exigences photométriques liées aux feux de circulation

Les recommandations sur le diagramme de rayonnement à utiliser proviennent d'une comparaison minutieuse aux normes associées aux feux de circulation, de sorte que la norme corresponde ou soit supérieure aux normes nord-américaine et européenne à tous les angles de mesure précisés. Le fait que les normes nord-américaine et européenne ne s'appuient pas sur les mêmes angles pour préciser l'intensité lumineuse vient compliquer la comparaison. Il faut donc extrapoler. Le tableau 25 montre qu'à chaque angle spécifié, la norme proposée correspond ou est supérieure aux exigences nord-américaines et européennes pour les feux de signalisation à grand angle sur les voies rapides.

Les graphiques tridimensionnels de la figure 40 montrent la forme des divers diagrammes, ce qui permet de les visualiser et de les comparer entre eux et avec les spécifications liées aux feux ferroviaires à incandescence.

Les graphiques 2D de la figure 41 permettent de comparer la norme proposée aux spécifications nord-américaines, européennes et australiennes concernant les feux de circulation ainsi qu'aux recommandations de la CIE auxquelles certaines publications font référence. Dans cet exercice de comparaison, il faut se rappeler que la norme proposée et la norme nord-américaine sont des «normes de rendement maintenu» régissant la signalisation à DEL, tandis que les normes de la CIE sont des «normes de rendement initial» qui se rapportent aux feux à incandescence et qui prévoient une marge de détérioration au fil du temps et à des températures appropriées aux ampoules à incandescence.

Tableau 25 – Comparaison entre les exigences photométriques proposées et les diagrammes de rayonnement des feux de circulation en usage en Europe/ITE

	30° D/G	***27,5° D/G***	***25° D/G***	***22,5° D/G***	***20° D/G***	***17,5° D/G***	***15° D/G***	***12,5° D/G***	***10° D/G***	***7,5° D/G***	***5° D/G***	***2,5° D/G***	***0°***
0°	<u>4</u> 15 ✓		40		<u>12</u> 75 ✓		150		<u>220</u> 250 ✓		<u>340</u> 375 ✓		<u>400</u> 400 ✓
2,5° B						**77** 113 ✓		**141** 200 ✓		**251** 300 ✓		**339** 363 ✓	
3° B											<u>300</u> 345 ✓		<u>320</u> 370 ✓
5° B	15		40		75		150		<u>140</u> 250 ✓		325		<u>240</u> 350 ✓
7,5° B		**16** 26 ✓		**38** 53 ✓		**89** 93 ✓		**145** 149 ✓		**202** 203 ✓		**226** 233 ✓	
10° B	15		35		<u>32</u> 60 ✓		85		110		125		<u>120</u> 130 ✓
12,5° B		**16** 21 ✓		**22** 35 ✓		**34** 50 ✓		**44** 65 ✓		**48** 78 ✓		**50** 85 ✓	
15° B	15		20		25		30		35		40		45
17,5° B		**16** 15 ✓		**20** 19 ✓		**22** 21 ✓		**22** 24 ✓		**22** 26 ✓		**22** 29 ✓	
20° B	<u>8</u> 10 ✓		15		15		15		15		15		<u>8</u> 15 ✓

Légende : ITE = **EN CARACTÈRES GRAS**
Norme européenne = <u>SOULIGNÉ</u>
Norme de TC à 400 cd = *ITALIQUE*
Valeurs interpolées à partir de la norme proposée = EN NOIR

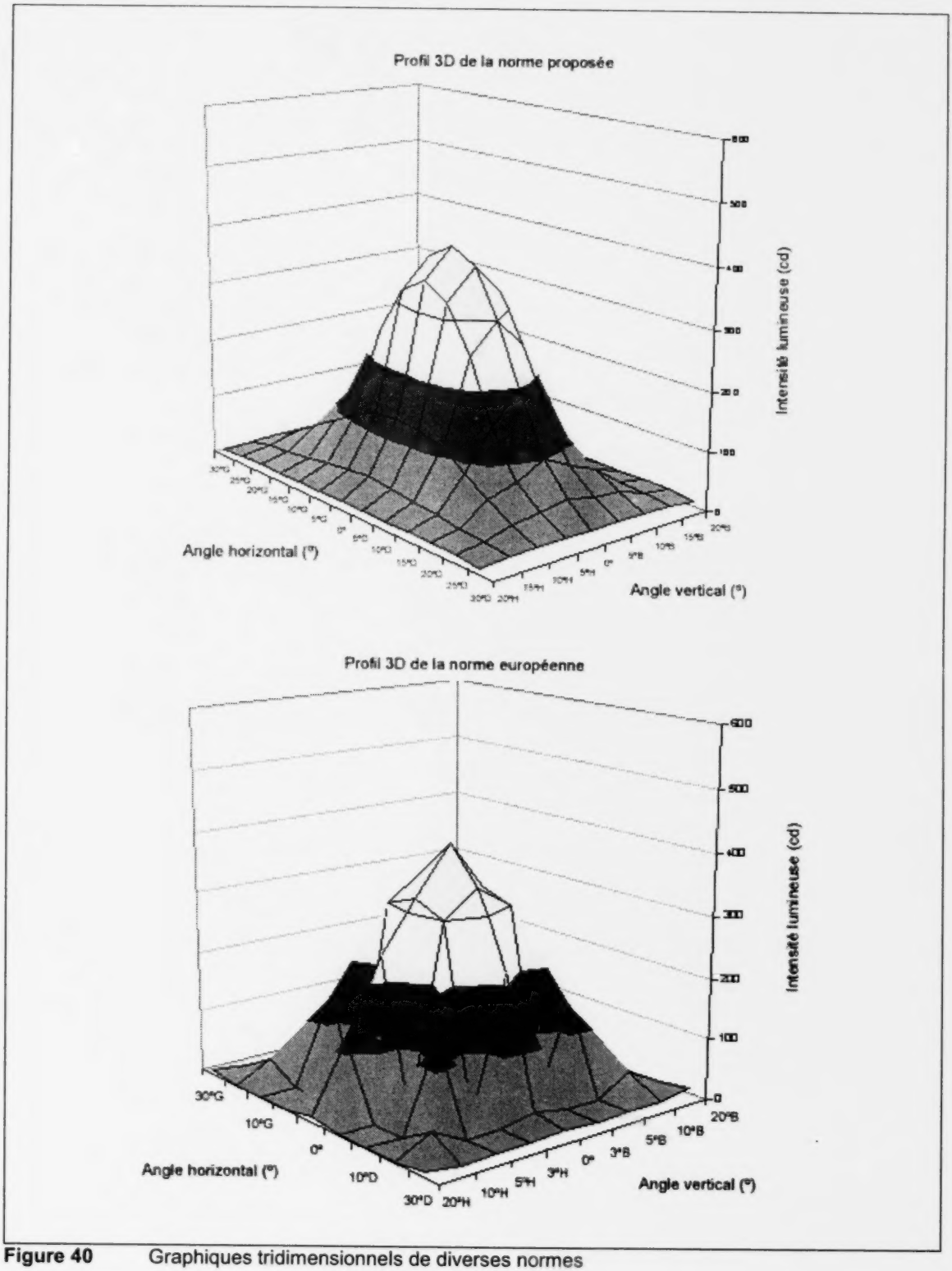


Figure 40 Graphiques tridimensionnels de diverses normes

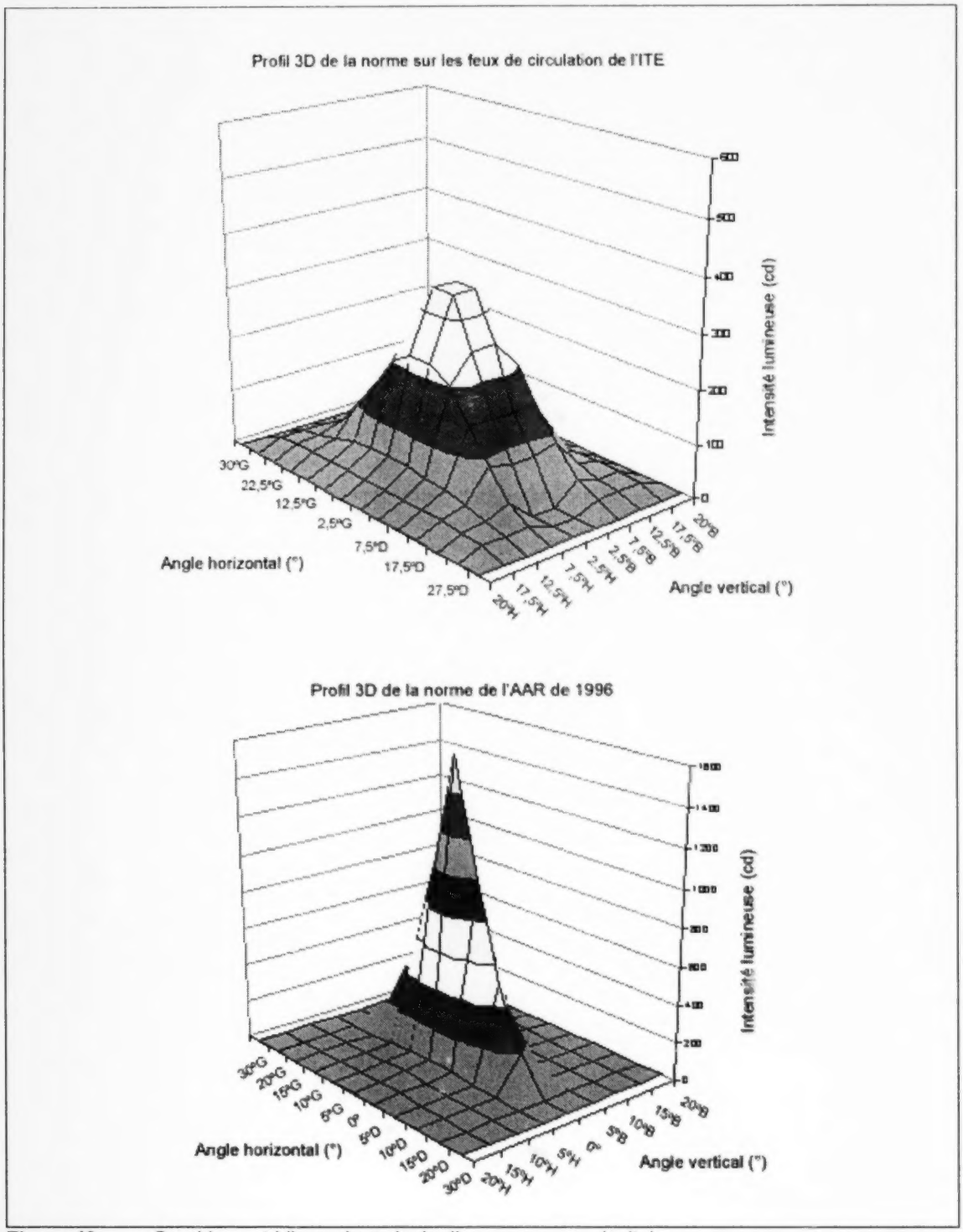


Figure 40 Graphiques tridimensionnels de diverses normes (suite)

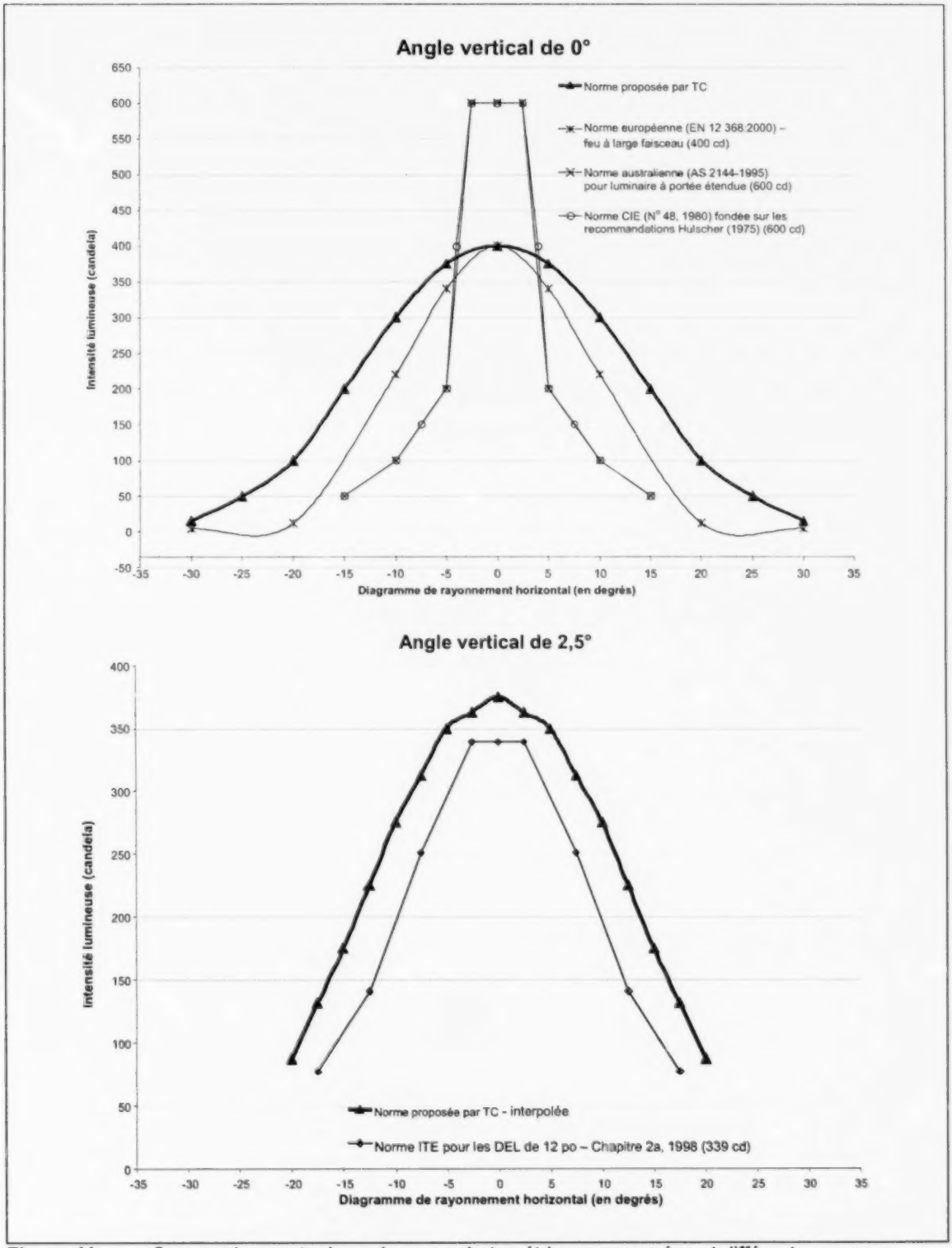


Figure 41 Comparaison entre les exigences photométriques proposées et différentes normes sur la photométrie des feux de circulation

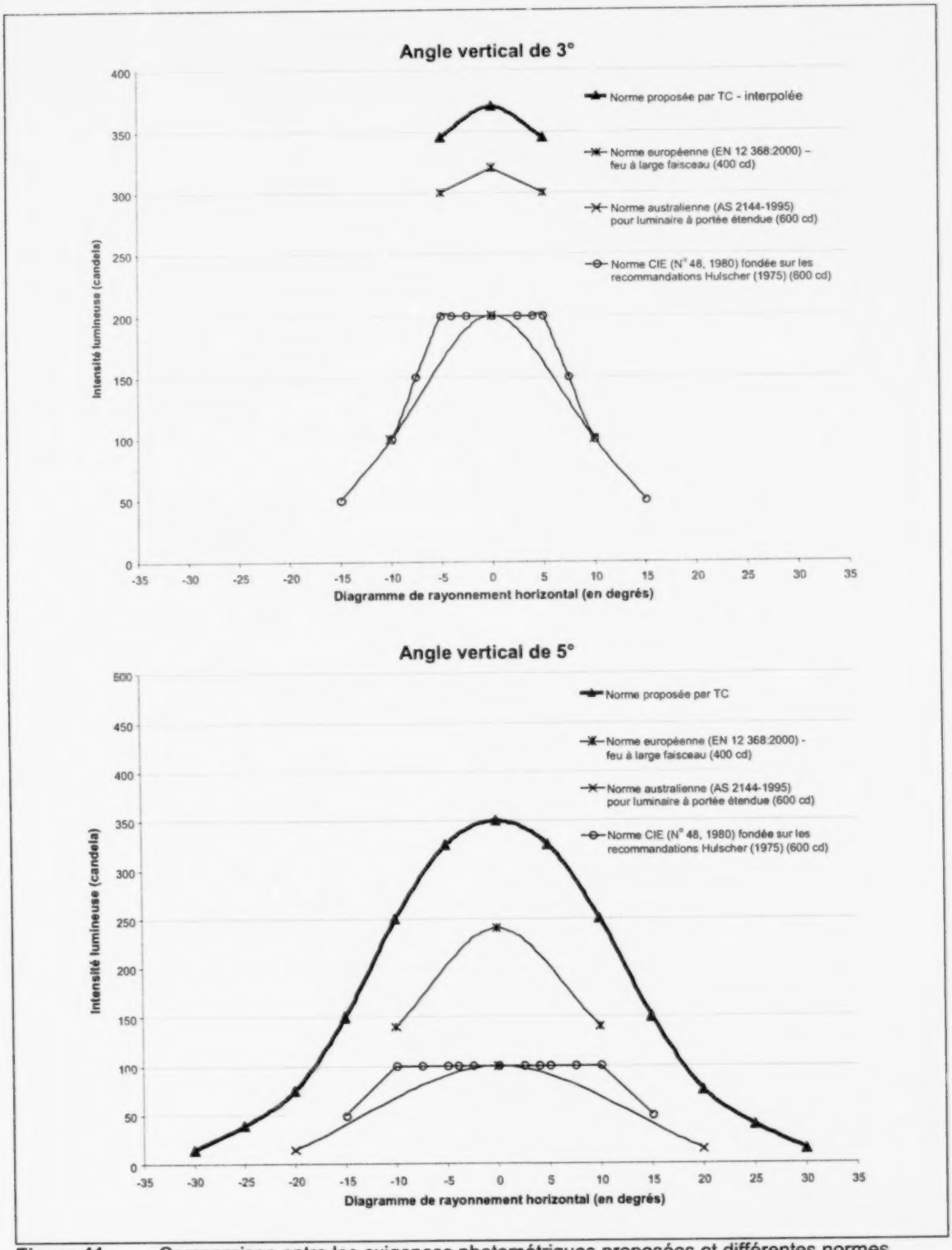


Figure 41 Comparaison entre les exigences photométriques proposées et différentes normes sur la photométrie des feux de circulation (suite)

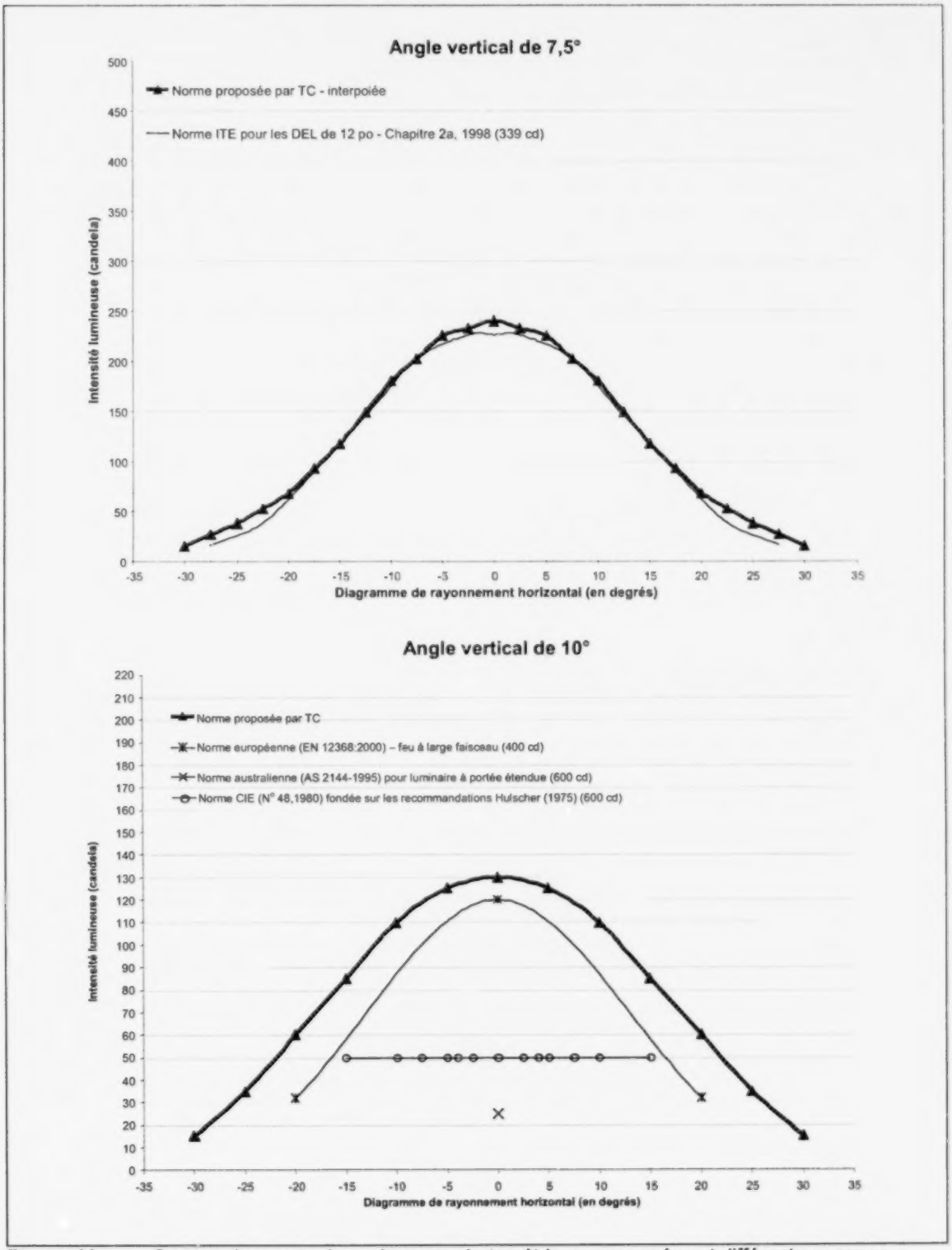


Figure 41 Comparaison entre les exigences photométriques proposées et différentes normes sur la photométrie des feux de circulation (suite)

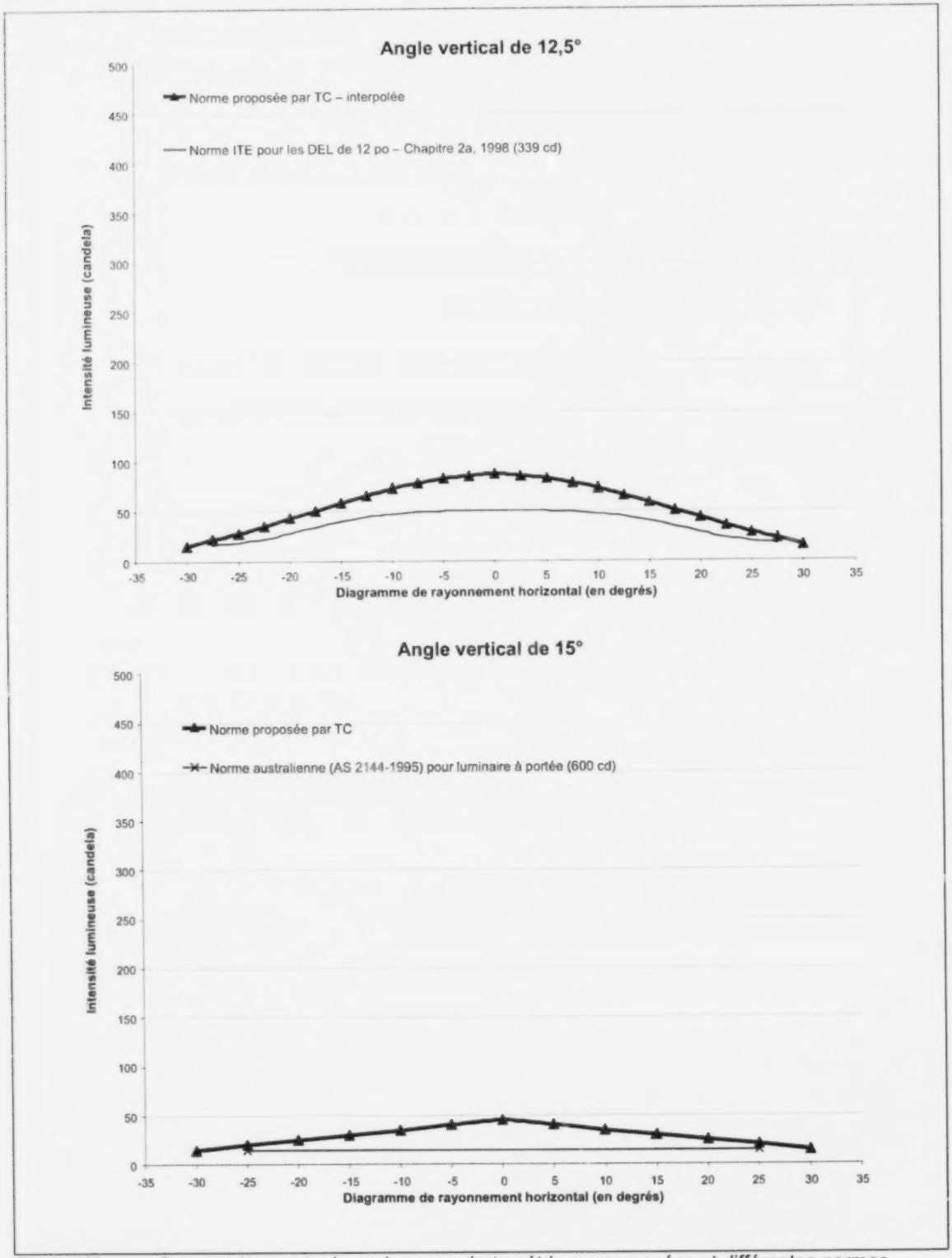


Figure 41 Comparaison entre les exigences photométriques proposées et différentes normes sur la photométrie des feux de circulation (suite)

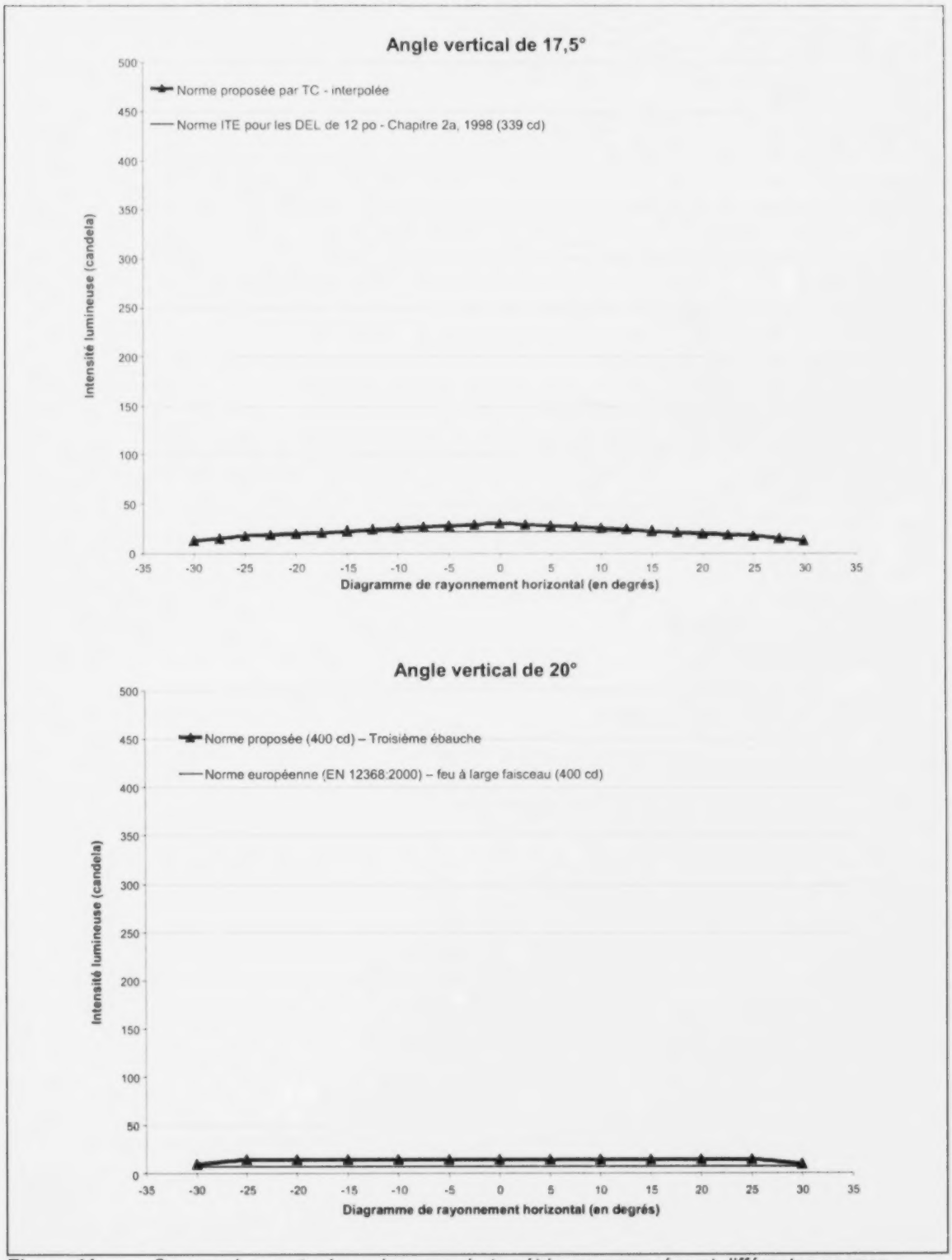


Figure 41 Comparaison entre les exigences photométriques proposées et différentes normes sur la photométrie des feux de circulation (suite)

9.10 Comparaison détaillée aux normes antérieures sur la photométrie ferroviaire

Les graphiques de la figure 42 comparent différentes normes de photométrie ferroviaire à la norme proposée. Les plus récentes normes de l'AREMA n'ont pas été utilisées, car les valeurs, précisées en portée visible et non en candela, se comparent difficilement aux autres normes. Il importe de se rappeler que les normes ferroviaires antérieures sont des «normes de rendement initial» sous tension de service nominale et que la puissance réelle de la signalisation à incandescence varie en fonction de la tension de service réelle, l'âge de l'ampoule, le désalignement de l'ampoule et du foyer du miroir parabolique et du vieillissement de la surface du miroir.

9.11 Comparaison aux diagrammes de rayonnement de divers échantillons de modules de signalisation à DEL

Les graphiques de la figure 43 comparent 4 échantillons de feux à DEL et un feu à incandescence de 8 po à la norme proposée. Il ressort des résultats qu'à la température ambiante et qu'à l'application d'une tension de 10,5 V, deux des quatre feux à DEL satisfont entièrement à la norme proposée. Le feu à incandescence ne satisfait pas à la norme, sauf lorsque la lumière est dans l'axe. Son faisceau lumineux est trop étroit.

Les résultats indiquent que la norme proposée est raisonnable et que la signalisation à DEL mettant en œuvre des lentilles de feux de circulation et alimentée de façon appropriée satisfait aux exigences relatives au diagramme de rayonnement.

9.12 Exigences relatives à la chromaticité

Les règlements routiers et ferroviaires s'appuient sur la méthode proposée par la Commission internationale de l'éclairage (CIE) pour définir les exigences en matière de chromaticité pour la signalisation. Cependant, les spécifications de l'AREMA (Manuel de l'AREMA, partie 7.1.10) permettent une gamme de couleurs légèrement plus étendue que les spécifications de l'Institute of Transportation Engineers (ITE) concernant la signalisation autoroutière en Amérique du Nord (ITE, 1998) et les spécifications de la CIE relatives aux feux de circulation en Europe (Pub. no. CIE 79, 1988), tel qu'indiqué au tableau 26.

Pour assurer l'utilisation d'une couleur constante et l'application des spécifications de couleur les plus strictes, nous recommandons l'adoption des exigences de chromaticité énoncées dans les spécifications de l'ITE. Tous les échantillions de modules à DEL mis à l'essai ont satisfait aux exigences de chromaticité de l'ITE.

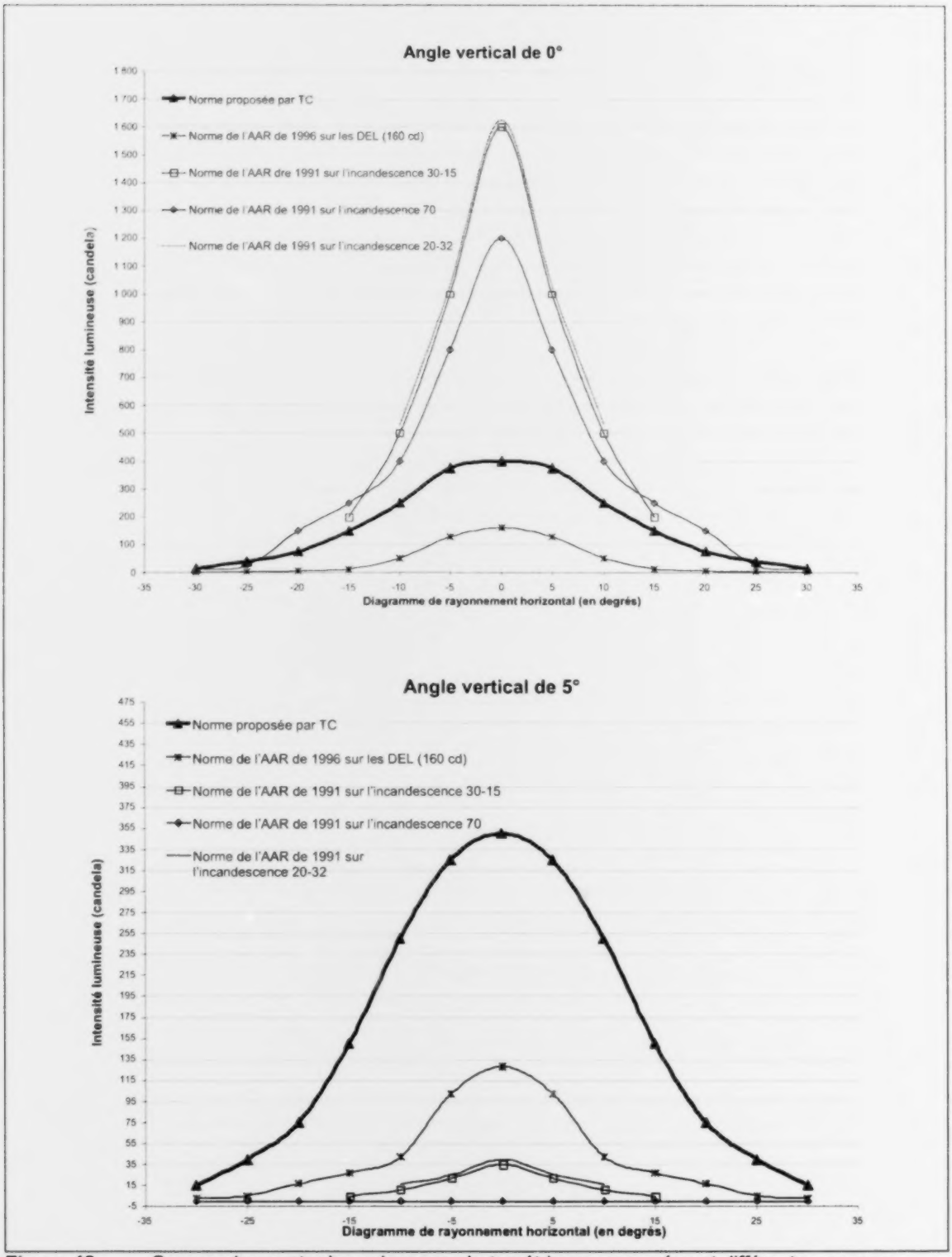
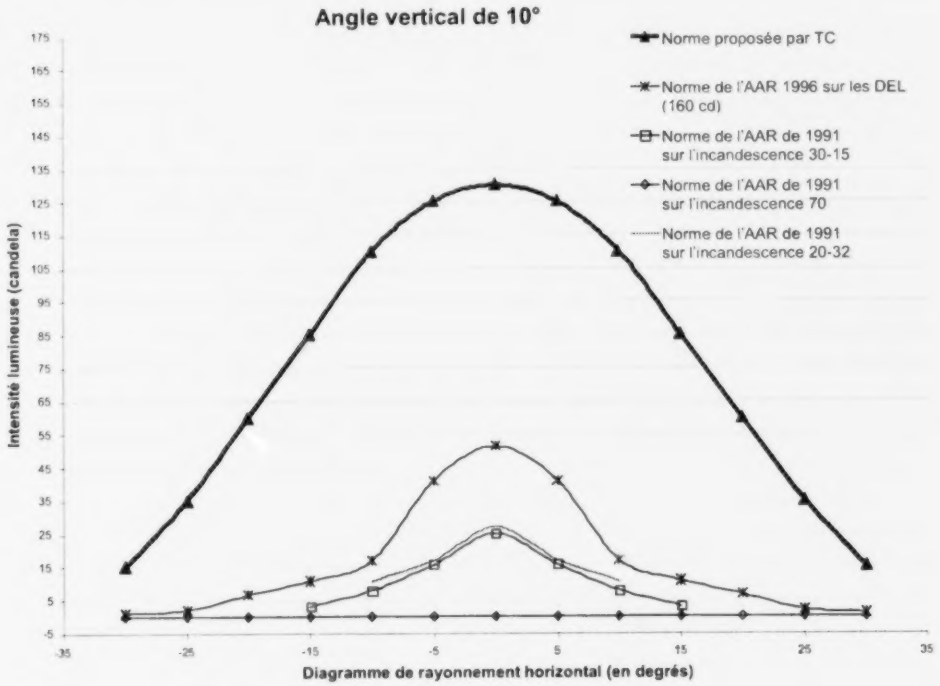


Figure 42 Comparaison entre les exigences photométriques proposées et différentes normes antérieures sur la photométrie ferroviaire



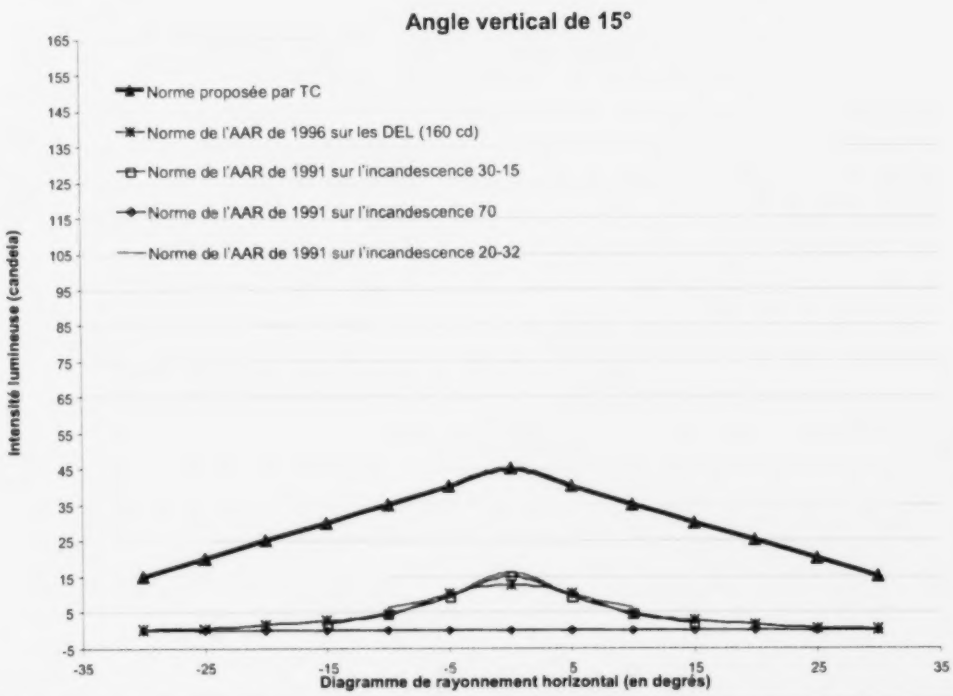
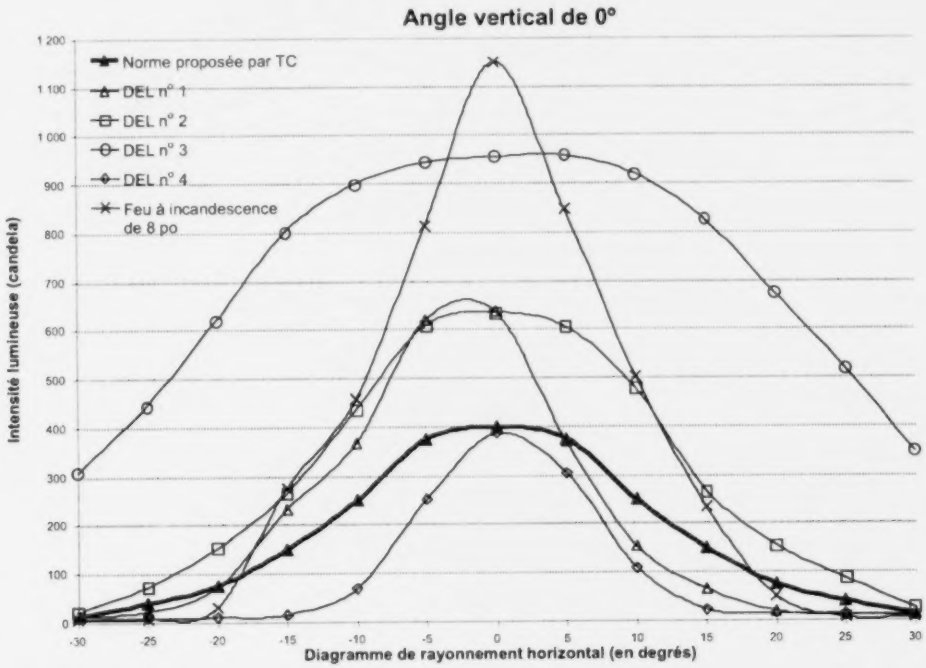


Figure 42 Comparaison entre les exigences photométriques proposées et différentes normes antérieures sur la photométrie ferroviaire (suite)



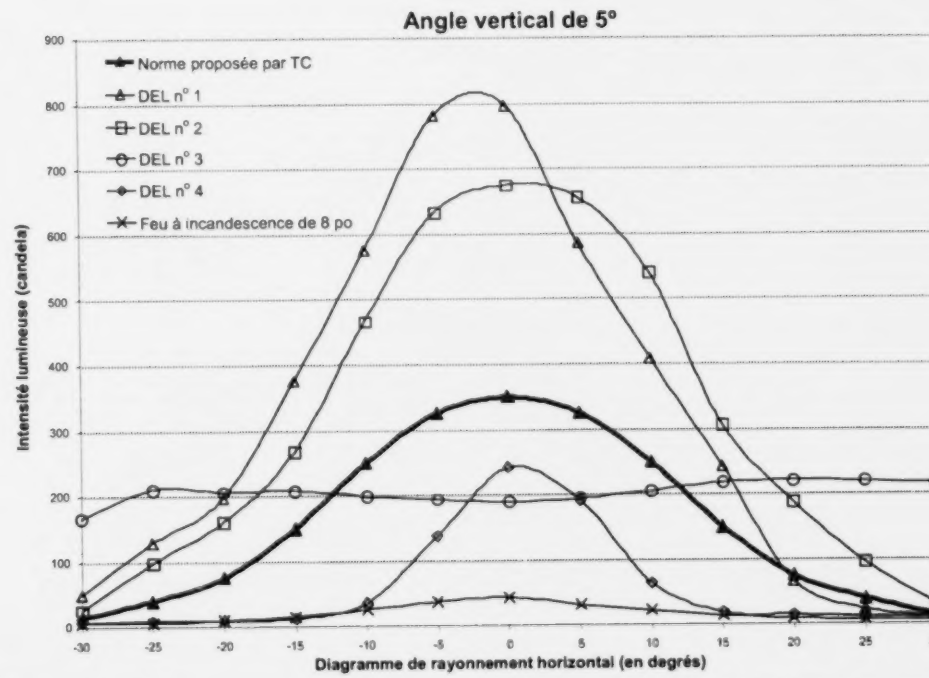
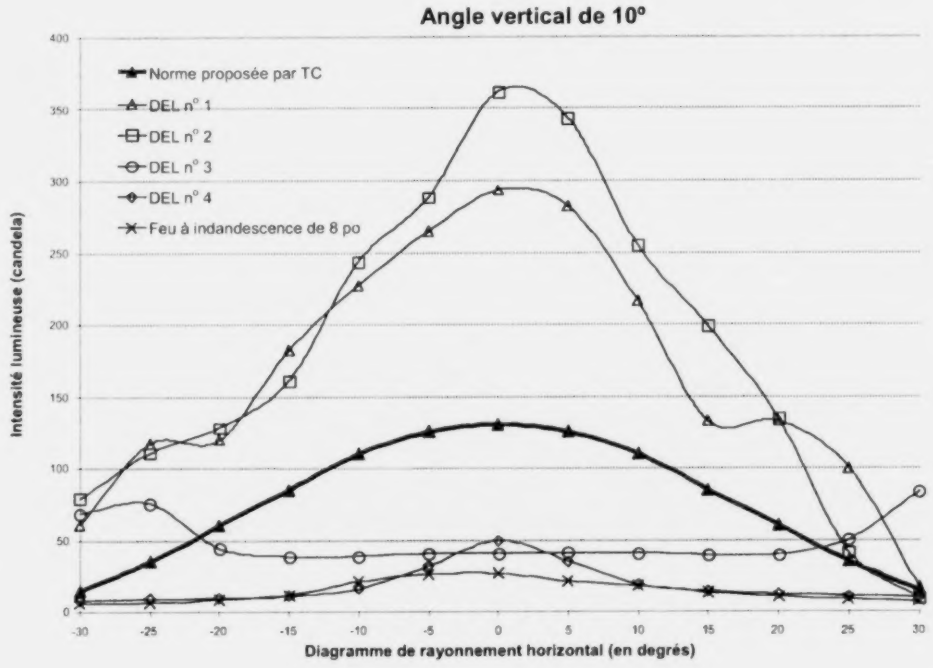


Figure 43 Comparaison entre les exigences photométriques proposées et des échantillons de modules de signalisation à DEL



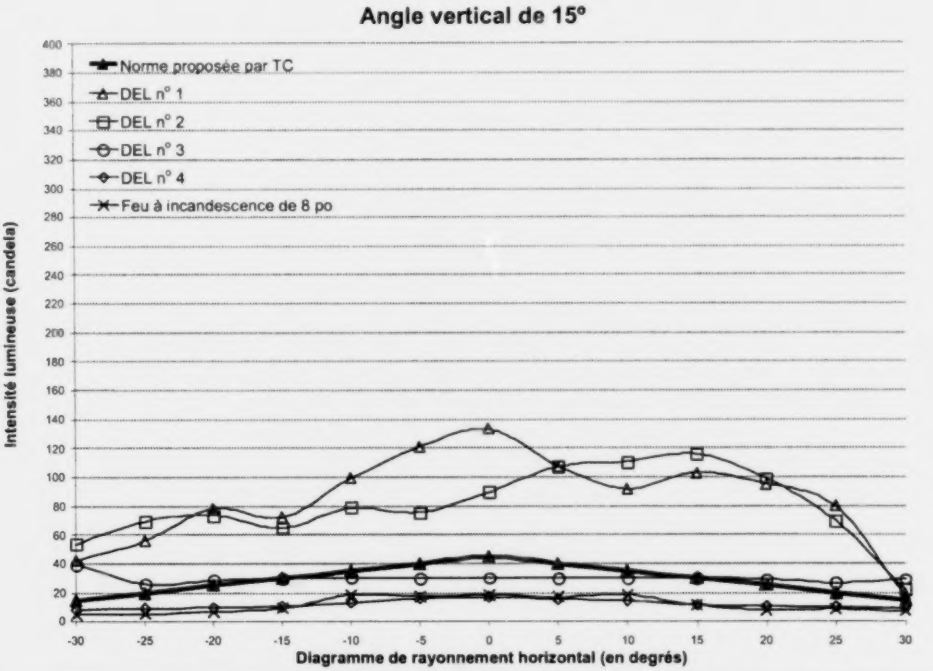


Figure 43 Comparaison entre les exigences photométriques proposées et des échantillons de modules de signalisation à DEL (suite)

Tableau 26 – Régions de chromaticité recommandées par différentes normes

Norme	Région de chromaticité
AREMA (Manuel Partie 7.1.10, 1998)	y < 0,330 y > 0,998-x
ITE (Chapitre 2, section 8.04, 1998)	y < 0,308 y > 0,998-x
CIE (Pub. No. CIE 79, 1988)	y < 0,320 y > 0,990-x y > 0,290

9.13 Exigences relatives à l'uniformité

Comme nous l'avons constaté, les modules de signalisation à DEL peuvent être dotés de plusieurs DEL ou de quelques-unes seulement. Grâce à la technologie des DEL, les modules de signalisation peuvent satisfaire aux exigences photométriques avec un nombre restreint de diodes qui créent un point brillant au centre de la lentille. Pour assurer l'illumination uniforme du module, il importe que le rapport entre la valeur maximale et la valeur minimale de luminance, mesuré sur une superficie moyenne de 500 mm^2, n'excède pas 5:1. Cette exigence correspond à celle prescrite dans le guide de la CIE «*Guide for the Design of Road Trafic lights*, 1988» :

> «Il importe que la surface de l'oculaire ou du symbole représentant le feu de circulation présente une luminance relativement uniforme et stable. Les résultats d'expériences en laboratoire tendent à préconiser un rapport entre les valeurs supérieures et inférieures de luminance de l'oculaire n'excédant pas 5:1. Dans le cas de feux de circulation composés de zones lumineuses distinctes, comme des faisceaux de fibres optiques, les normes et codes de pratiques nationales devraient prescrire un rapport inférieur à 5:1 pour les zones de luminance adjacentes.» (traduction libre)

Cette norme est plus stricte que la norme européenne (EN 12368 : 2000) fondée sur un rapport de 10:1. Pour déterminer si la norme CIE est trop rigoureuse, nous avons mis à l'essai cinq échantillons de modules. Tous ont satisfait à l'exigence du rapport 5:1.

ESSAI	Feu 1	Feu 2	Feu 3	Feu 4	Feu 5
Uniformité de l'illumination	3:1	3:1	2:1	2:1	2:1

9.14 Exigences relatives au temps d'allumage

Les DEL présentent notamment l'avantage de s'allumer et de s'éteindre instantanément, ce qui améliore leur intensité active en mode de clignotement. Toutefois, l'alimentation des modules de signalisation à DEL doit répondre aux exigences des clients qui veulent un éclairage constant dans une vaste plage de tensions en courant alternatif ou en courant continu. De telles exigences en matière d'alimentation peuvent se traduire par un ralentissement du temps d'allumage (de montée) et d'extinction (de descente). Par conséquent, on risque de perdre l'avantage offert par les DEL en matière de temps d'allumage. Le temps de montée des ampoules à incandescence est d'environ 150 ms. Pour que la norme proposée soit efficace, le temps d'allumage (et d'extinction) des modules doit être plus rapide, et ne pas excéder 75 ms. (La plupart des modules privilégiés ne compromettraient pas la caractéristique d'allumage et d'extinction instantanées inhérente aux DEL.)

L'imposition d'un temps d'allumage et d'extinction des feux permettrait en outre d'accroître la vitesse de clignotement des signaux ferroviaires. La cadence de clignotement actuelle, établie à un maximum de 60 cycles, est le rendement maximal des feux à incandescence. Un temps d'allumage et d'extinction des signaux à DEL réduit à 75 ms permettrait de doubler la cadence de clignotement.

Des essais menés sur cinq types d'échantillons de modules à DEL ont produit des résultats très variés concernant le temps d'allumage et d'extinction :

ESSAI	Feu 1	Feu 2	Feu 3	Feu 4	Feu 5
Tems d'allumage	140 ms	139 ms	4 ms	0 ms	36 ms
Temps d'extinction	+300 ms	45 ms	45 ms	0 ms	30 ms

10. EXIGENCES ENVIRONNEMENTALES

10.1 Température

Les exigences en matière de température pour la signalisation à DEL revêtent plus d'importance que pour les anciens feux à incandescence. En voici les raisons :

- La puissance lumineuse des DEL varie considérablement en fonction de la température; la puissance diminue au fur et à mesure que la température augmente. Cette variation peut atteindre jusqu'à 1 % pour chaque degré Celcius de variation.
- Les modules de signalisation à DEL sont dotés de sources d'alimentation passablement complexes, tandis que les ampoules à incandescence n'en ont aucune. Les sources d'alimentation peuvent influer considérablement sur le rendement des feux. Par exemple, par temps froid, le module pourrait ne pas s'allumer.

La figure 44 illustre les variations de puissance lumineuse de quatre échantillons de modules à DEL soumis à une augmentation de température, allant de la température ambiante à environ 75 °C. La puissance des feux diminue, mais cette diminution n'est pas la même pour tous les modules. Par contre, la température n'a pas d'incidence sur la puissance lumineuse des feux à incandescence. Il importe donc d'exiger que les modules de signalisation à DEL offrent la puissance requise dans la plage complète de leurs températures nominales. En ce qui concerne les signaux ferroviaires aux passages à niveau, la plage de températures spécifiée se situe entre -40 °C à 70 °C. La norme proposée préconise aussi cette plage.

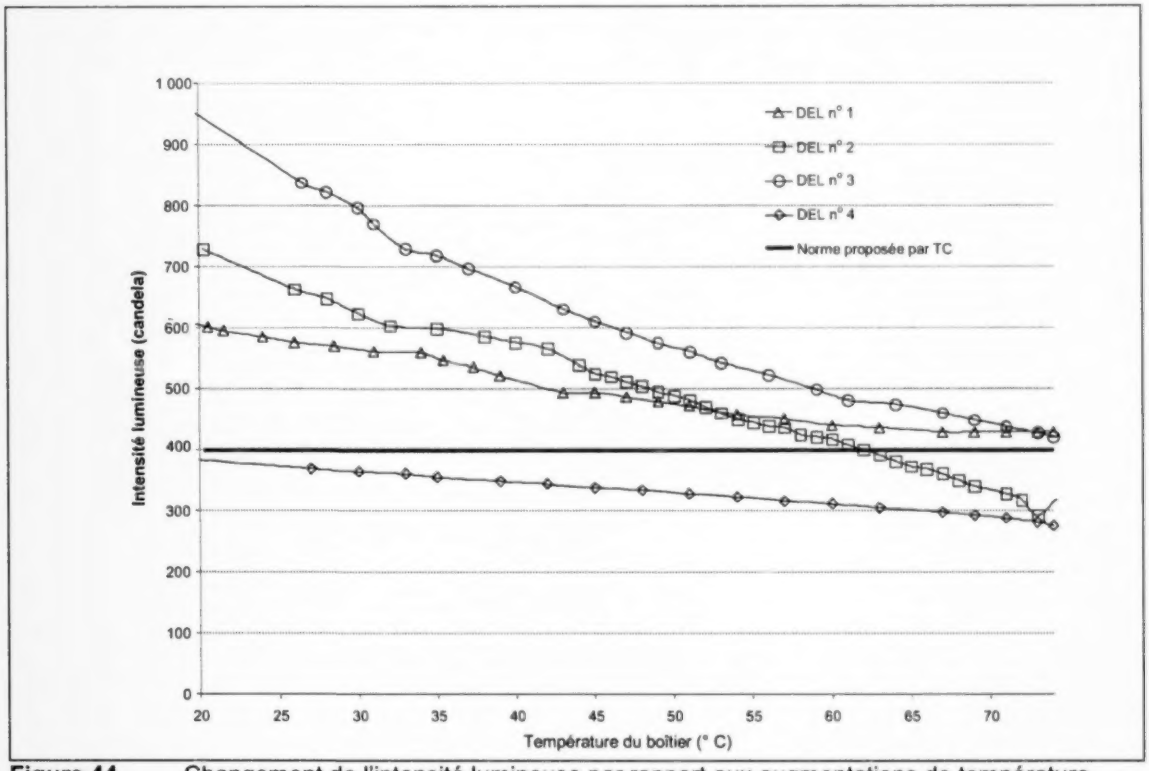


Figure 44 Changement de l'intensité lumineuse par rapport aux augmentations de température et comparativement à la norme proposée

Par temps très froid, les DEL produisent efficacement de la lumière, et la puissance lumineuse ne soulève aucune inquiétude. Cependant, les sources d'alimentation des DEL risquent de fonctionner de façon inconstante à basse température. Parmi les problèmes les plus courants, on constate que les basses températures font augmenter la tension requise pour allumer un feu à DEL. (Les feux de signalisation à incandescence ne subissent pas cet effet.) Le tableau suivant indique la tension requise pour allumer cinq types de modules de signalisation à DEL à une température de -40 °C. Par temps très froid, tous les modules soumis aux essais ont eu besoin d'une tension supérieure pour s'allumer. À -40 °C, le module 3 s'est allumé convenablement à une tension de 10 V.

ESSAI	Feu 1	Feu 2	Feu 3	Feu 4	Feu 5
Fonctionnement par temps froid (-40 °C)	Allumage à 7,9 V	Allumage à 8,15 V	À peine allumé à 7 V, faible intensité à 8 V, portion inférieure brillante à 9 V (portion supérieure encore faible), idem à 10 V	Allumage à 7 V	Allumage à 8 V

Pour que les modules à DEL fonctionnent efficacement dans la plage complète des exigences thermiques, nous précisons dans les spécifications techniques que le fabricant de modules doit être en mesure de démontrer que ses appareils fonctionnent dans la plage complète des températures comprises entre -40 °C à 70 °C et nous recommandons que la norme AREMA 3.2.35 soit modifiée en conséquence. Nous demandons également que le fabricant fournisse un graphique illustrant la puissance lumineuse des appareils dans la plage de températures allant de -40 °C à 70 °C à la tension de fonctionnement nominale.

10.2 Fonctionnement en continu

En deuxième lieu, on se préoccupe du fonctionnement en continu des DEL, ce qui n'est pas le cas pour la signalisation à incandescence. Les DEL qui demeurent toujours allumées se réchauffent graduellement. L'effet thermique dont il a été question précédemment entraîne une diminution de leur puissance lumineuse. La figure 45 illustre la variation de puissance qui se produit dans quatre échantillons de modules DEL de différentes provenances et laissés allumés pendant 30 minutes. La puissance lumineuse des feux à incandescence n'est pas affectée par le fonctionnement en continu, tandis que celle de certains modules à DEL chute rapidement avant de se stabiliser. (La variation temporelle du rendement des modules à DEL n'est pas tant attribuable à la diversité des DEL testées qu'à leur source d'alimentation. Certains fabricants ajoutent un circuit de compensation à leur source d'alimentation.)

Pour tenir compte de la variabilité du rendement au fil du temps, nous avons formulé la norme de manière à ce qu'elle exige que les modules de signalisation à DEL satisfassent aux exigences photométriques après une heure de fonctionnement en continu. Puisque la température et la puissance lumineuse des DEL se stabilisent après une heure, on dispose d'un point de mesure stable.

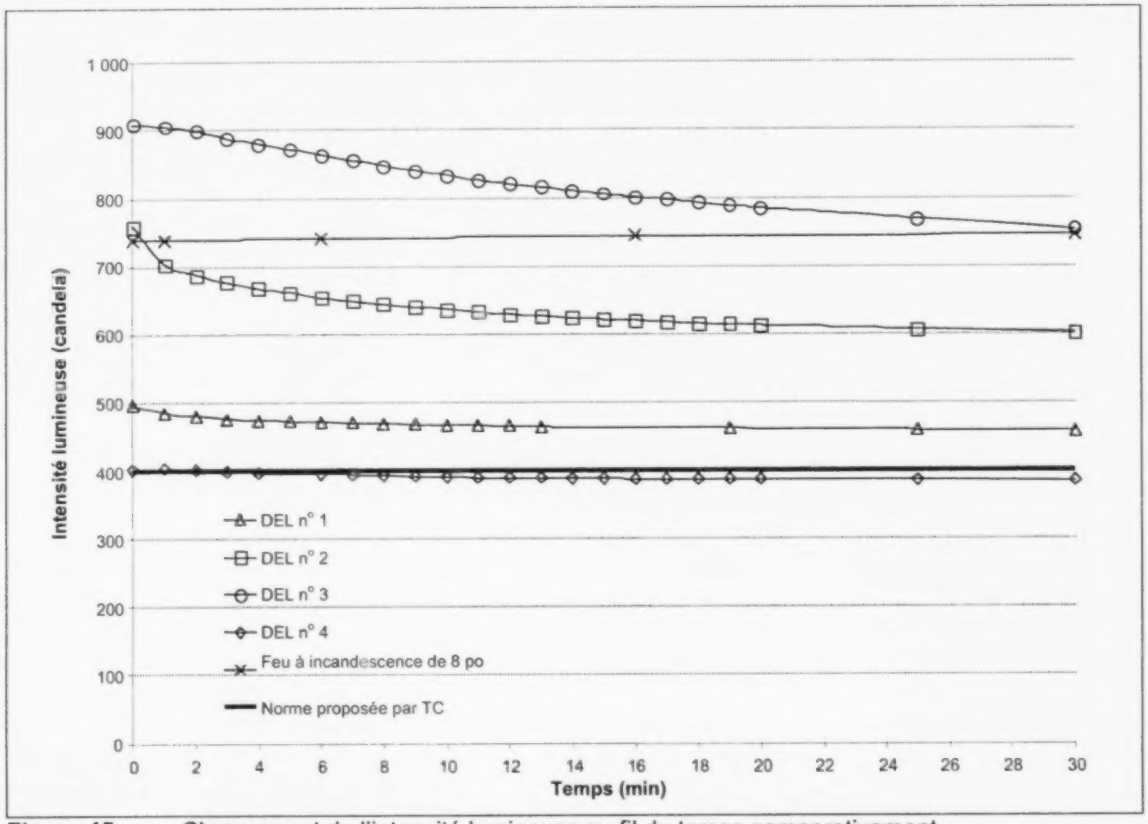


Figure 45 Changement de l'intensité lumineuse au fil du temps comparativement à la norme proposée

10.3 Vieillissement

Avec le temps, les feux à DEL, tout comme les feux à incandescence, subissent une réduction de leur puissance lumineuse. À la longue, les ampoules à incandescence ont tendance à noircir. Dans le cas des DEL, la puissance lumineuse diminue très lentement, mais puisqu'ils ont une très longue durée de vie et qu'on les laisse en service si longtemps, il faut se pencher sur la question de la dégradation à long terme.

Comparativement aux feux de circulation rouges, qui ont un cycle de service d'environ 40 %, on estime que le fonctionnement moyen annuel d'un feu de passage à niveau est d'environ 300 heures, ce qui correspond à un cycle de service d'environ 3,4 %. Ces chiffres indiquent que le vieillissement des DEL s'étend sur une très longue période. Toutefois, pour que ce facteur soit pris en compte, il importe que les feux à DEL continuent de satisfaire aux exigences photométriques jusqu'à la fin de leur durée de vie prévue, laquelle est établie à 10 000 heures (33 ans, à raison de 300 heures par année!). Le fabricant doit démontrer qu'il a tenu compte d'un facteur de dégradation de la puissance lumineuse prévue qui répond aux exigences photométriques.

Lors de l'essai de vieillissement de quatre feux à DEL, laissés allumés 1 250 heures en tout, on n'a constaté aucune diminution statistiquement importante de la puissance. Selon les données fournies par les fabricants, on peut s'attendre à ce que les DEL perdent environ 10 % de leur

puissance lumineuse après 10 000 heures de fonctionnement, dépendamment du courant utilisé pour les alimenter.

Il est possible de comparer en service le rendement d'un feu à DEL âgé à son rendement initial à l'aide d'un dispositif appelé Traffic Signal Light Tester, modèle TSL 2000, mis au point par Spectra Light Laboratories (www.spectralightlab.com).

11. EXIGENCES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

11.1 Conception du module

La présente norme s'applique au module de signalisation à DEL et non au boîtier comme tel. Le module doit pouvoir loger dans les boîtiers existants (par exemple, Western Colleen Hayes, Safetran, GRS, Harmon). Les fabricants doivent préciser les boîtiers qui sont compatibles avec les modules offerts, selon le «Communications & Signals Manual, partie 3.2.35,1999» de l'AREMA. Le tableau suivant porte sur la compatibilité entre cinq modules de signalisation à DEL et divers boîtiers standard.

ESSAI	Module 1	Module 2	Module 3	Module 4	Module 5
Compatibilité des boîtiers	Oui	Oui	Oui, sauf un	Oui	Oui

Lentilles

Les modules à DEL ne nécessitent pas de lentilles colorées. Au contraire, la lumière du soleil bas dans le ciel peut créer un «effet fantôme» dans la lentille colorée qui absorbe une partie de la lumière émise par le module. Nous recommandons l'utilisation de feux à DEL dotés de lentille transparente, mais puisque le public est habitué aux lentilles rouges, nous recommandons de permettre également le recours aux lentilles rouges. Par conséquent, les spécifications du boîtier doivent correspondre à celles du «Communications & Signals Manual, Partie 3.2.35,1999» de l'AREMA, sauf qu'il peut être doté d'une lentille transparente ou rouge.

Dimension

Pour les routes à circulation rapide ou dangereuses, on privilégie des feux de 300 mm. Les feux de 200 mm sont acceptables aux endroits où on estime qu'ils sont efficaces. La norme est censée s'appliquer aux feux des deux dimensions.

Fenêtres latérales de vérification

Grâce aux fenêtres latérales, on peut vérifier que les feux fonctionnent. Il arrive souvent que les ampoules à incandescence brûlent et, pour vérifier leur état, il suffit de regarder par la fenêtre pratiquée dans la paroi latérale du boîtier. Il serait sensé d'exiger que les feux à incandescence soient dotés d'une fenêtre latérale. Mais pour ce qui est des feux à DEL, les risques de panne sont plutôt restreints, et la complexité associée à la production d'une fenêtre latérale efficace augmente les coûts et les risques de panne des feux. Par conséquent, la norme n'exige pas la présence de fenêtres latérales; elles sont sont facultatives dans les spécifications techniques. Parmi les cinq échantillons de feux à DEL mis à l'essai, seulement deux comportaient des fenêtres latérales efficaces.

ESSAI	FEU 1	FEU 2	FEU 3	FEU 4	FEU 5
Efficacité de la fenêtre latérale	Non	Oui	Non	Non	Oui

Écrans de visibilité et visières

À l'heure actuelle, les écrans de visibilité et les visières qui équipent les signaux aux passages à niveau sont de couleur noire. En ce qui concerne les feux à DEL, la couleur noire n'est pas idéale, car elle absorbe la chaleur et fait chauffer le boîtier. Les écrans de visibilité jaunes sont fréquemment utilisés en signalisation routière. Par conséquent, nous recommandons de suivre les lignes directrices du Manuel canadien de la signalisation routière, section B3.2.3, énonçant que les écrans de visibilité doivent être de couleur jaune, bien que le noir mat peut être utilisé lorsqu'on estime que cette couleur est plus efficace.

Identification du module

Selon le C&S Manual, partie 3.2.35, 1999 de l'AREMA :

Les modules de signalisation à DEL doivent porter les informations suivantes :

Passages à niveau : DEL, rouge.
Classification de la déviation du faisceau : Universelle.
Tension de service : _____
Consommation de courant sous tension de service : _____
Satisfaits aux spécifications de Transports Canada : 2002
Numéro de série : _____
Date de fabrication : _____

S'il faut orienter les modules ou ses composantes, ils doivent porter en un endroit bien en vue une flèche indélébile pointant vers le haut.

11.2 Vibration

Selon le C&S Manual, partie 11.5.1, 1997 de l'AREMA (*Recommended Environmental Requirements for Electrical and Electronic Railroad Signal System Equipment*).

12. EXIGENCES ÉLECTRIQUES

Les exigences de la norme en matière d'alimentation électrique s'inspirent des spécifications de l'AREMA. Par exemple, la partie 3.2.35 de l'AREMA exige que les modules de signalisation puissent fonctionner en courant continu (valeur nominale de 10 V); en polarité inversée du courant continu et en courant alternatif de 10 V. Cette exigence n'est pas difficile à respecter dans le cas d'une ampoule à incandescence puisque la seule composante est le filament résistif à l'intérieur de l'ampoule. Cette dernière peut donc fonctionner correctement dans ces trois conditions. Cependant, pour ce qui est des DEL, les mêmes exigences ne sont pas aussi faciles à respecter. Les DEL ne pouvant pas fonctionner en polarité inversée, il faut utiliser un bloc d'alimentation relativement complexe. Des cinq modules à DEL soumis aux essais, quatre ont fonctionné correctement, tandis qu'une cinquième n'a pas fonctionné en polarité inversée et scintillait en alternatif.

ESSAI EFFECTUÉ	Feu 1	Feu 2	Feu 3	Feu 4	Feu 5
Polarité inversée	Oui	Oui	Non	Oui	Oui
En alternatif	Oui	Oui	Scintillement	Oui	Oui

Il est possible que soient abandonnées les exigences concernant le fonctionnement en alternatif et en polarité inversée dans la partie 3.2.35 de l'AREMA puisqu'elles contribuent aux coûts et à la complexité des modules de signalisation. Si un changement survenait, il n'affecterait pas directement la norme puisqu'elle s'inspire des exigences de l'AREMA en la matière.

En plus des exigences actuelles de l'AREMA sur l'alimentation électrique, il y a un certain nombre de nouvelles exigences électriques propres au DEL que nous recommandons d'ajouter à la partie 3.2.35 de l'AREMA. Des essais effectués sur des modules de signalisation échantillons ont permis de révéler que les blocs d'alimentation utilisés par divers fabricants étaient à l'origine d'anomalies qui devaient être prises en compte au moment d'acheter les modules.

12.1 Intensité lumineuse en fonction de la tension

Pour ce qui est de l'intensité lumineuse en fonction de la tension appliquée, le comportement des ampoules incandescentes est facile à comprendre : une augmentation de la tension appliquée entraîne un accroissement de l'intensité lumineuse de l'ampoule, d'une façon raisonnablement linéaire. Cependant, les modules de signalisation à DEL ne se comportent pas du tout de la même manière. La figure 46 montre les courbes très différentes provenant de divers feux de signalisation à DEL et d'un feu de signalisation à incandescence.

C'est ainsi que nous formulons nos recommandations relatives aux spécifications d'achat et à l'inclusion dans l'AREMA :

- Le module de signalisation à DEL doit fonctionner dans les limites des spécifications pour toutes les tensions susceptibles d'être utilisées pendant l'exploitation normale d'un feu de signalisation à un passage à niveau. Plus précisément, dans le cas des infrastructures existantes comportant des feux de signalisation, le module doit fonctionner dans les limites des spécifications lorsqu'il est alimenté par une source c.a. ou c.c. dans une plage de tension variant entre 8,5 à 14 V.
- Le fabricant doit fournir un graphique de l'intensité lumineuse par rapport à la tension sur une plage de tensions variant entre 0 et 18 V.

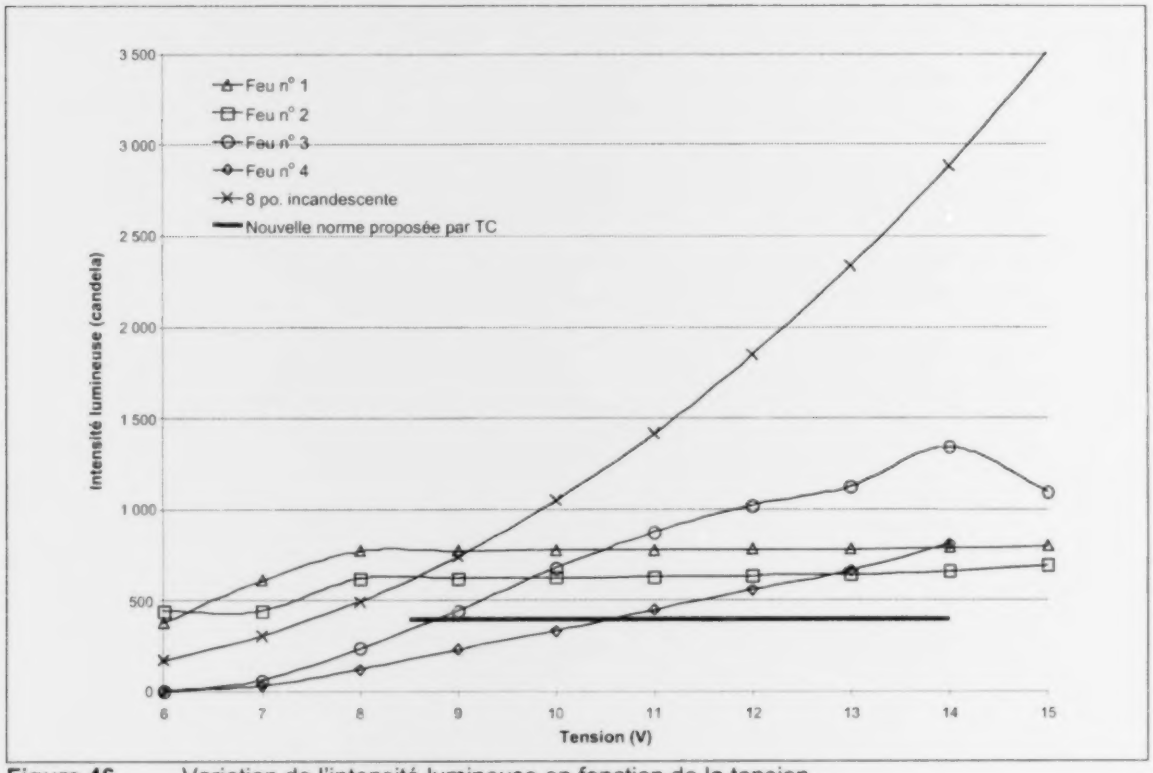


Figure 46 Variation de l'intensité lumineuse en fonction de la tension, comparativement à la norme proposée

12.2 Surtension

La spécification actuelle dans l'AREMA n'est pas très rigoureuse en ce qui à trait à la variation de la tension appliquée, puisqu'elle indique simplement que le module de signalisation doit fonctionner à +/- 15 % de la tension de fonctionnement nominale. Puisque la tension appliquée peut varier au-delà de cette valeur, nous avons fait l'essai de cinq modules de signalisation jusqu'à une tension de 20 V (c.c.). Quatre des modules ont fonctionné au delà de cette tension, tandis qu'un composant du cinquième a claqué à une tension d'environ 18 V.

- Le module de signalisation à DEL doit être conçu de façon à ne pas être endommagé par une surtension modérée. Plus précisément, pour une infrastructure courante de passage à niveau, le module doit demeurer en fonctionnement lorsqu'il est alimenté par une source c.a. ou c.c. pouvant atteindre 18 V.

ESSAI EFFECTUÉ	Feu 1	Feu 2	Feu 3	Feu 4	Feu 5
Opérationnel jusqu'à une tension appliquée de 20 V?	Oui	Oui	Non	Oui	Oui

12.3 Consommation de courant

Les ampoules à incandescence utilisées aux passages à niveau sont généralement des ampoules 8 W alimentées à une tension de 10 V. Elles consomment par conséquent 1,8 A

à la tension de fonctionnement nominale. Afin de ne pas réduire la durée de fonctionnement de la batterie dans le cas d'une panne d'alimentation et d'assurer que les montages du circuit de courant aux passages à niveau continueront de fonctionner normalement, les signaux DEL doivent être de la même puissance. La figure 47 montre les résultats des essais réalisés sur quatre modules de signalisation à DEL et sur un module de signalisation à ampoule à incandescence relativement à la consommation courante dans la plage de tensions de fonctionnement. Un module de signalisation à DEL consommait de plus en plus de courant à mesure que la tension était réduite, un autre en consommait moins, tandis que la consommation d'un troisième était relativement constante par rapport à la tension. Afin d'assurer que la consommation de courant d'un module de signalisation à DEL ne soit pas excessive, nous ajoutons les exigences suivantes dans nos spécifications d'achat et proposons que l'article 3.2.35 de l'AREMA soit modifié pour y inclure les mêmes exigences :

- Le module de signalisation à DEL ne doit pas consommer plus de 2 A sur toute la plage de tensions susceptibles d'être appliquées dans le cadre de l'exploitation normale d'un module de signalisation à un passage à niveau. Le fabricant doit fournir un graphique de la consommation de courant par rapport à la tension dans la plage de 0 à 18 V.

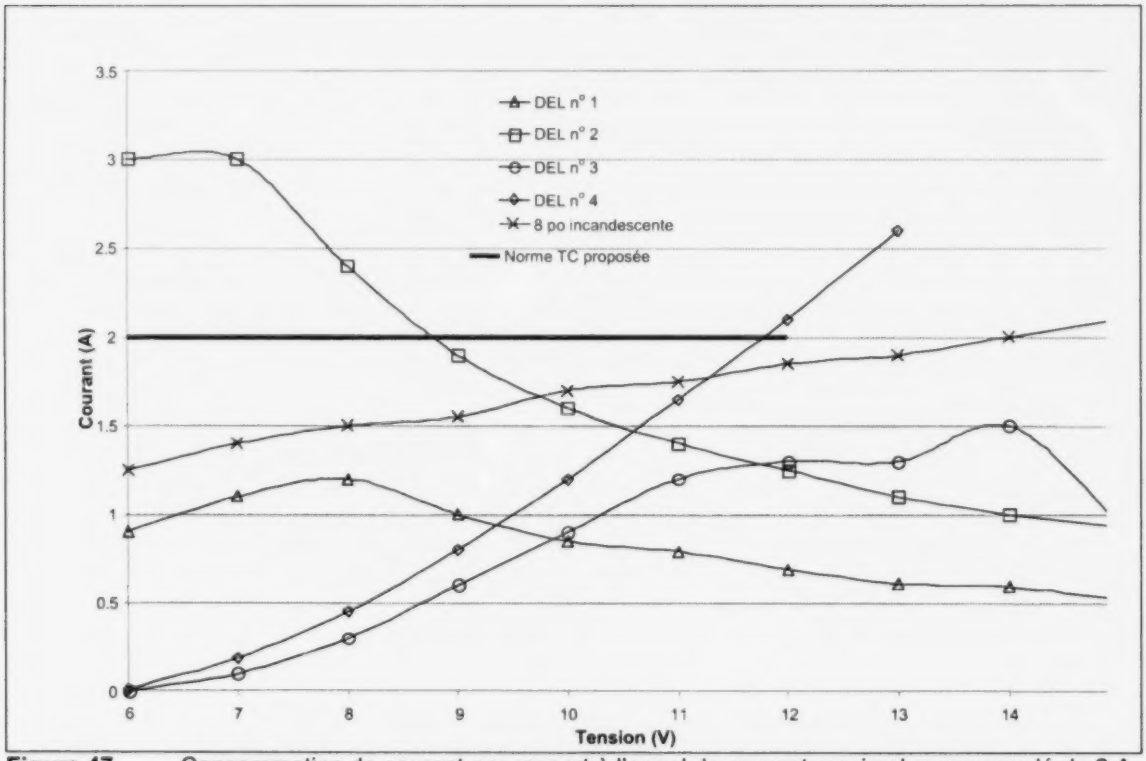


Figure 47 Consommation de courant par rapport à l'appel de courant maximal recommandé de 2 A

12.4 Défaillance d'une DEL

Un des avantages de la technologie DEL est que cette dernière fait appel à de multiples sources lumineuses, plutôt qu'à un seul filament comme dans le cas des ampoules à incandescence. Cet avantage peut toutefois être perdu quand la source d'éclairage à DEL est câblée de telle manière que la défaillance d'une DEL entraîne celle de presque toutes

les autres. Afin de s'assurer que la sortie lumineuse peut supporter la perte d'une DEL, nous recommandons l'inclusion des exigences suivantes dans les spécifications d'achat.

- Toutes les DEL doivent être branchées de manière que si l'une d'entre elles devaient cesser de fonctionner, les pertes maximales ne devraient pas dépasser 20 % de la capacité d'éclairement du module de signalisation.

Nous recommandons également la suppression de la partie suivante de l'article 3,2,35 de l'AREMA «Lorsque des DEL sont utilisées comme source lumineuse, le module de signalisation doit être considéré comme défectueux lorsque plus de 50 % des diodes électroluminescentes sont hors service». La présente norme vise à assurer le maintien intégral de l'intensité lumineuse en tout temps. Tout module de signalisation à DEL qui ne satisfait pas à la norme doit être mis hors service.

12.5 Appel de courant

Le bloc d'alimentation d'un module de signalisation à DEL doit produire des courants de pointe relativement élevés pour amorcer le signal. La combinaison des courants de pointe élevés provenant de plusieurs modules de signalisation à DEL pourrait résulter en une surcharge des capacités du bloc d'alimentation au passage à niveau. La figure 48 montre les résultats des essais réalisés sur quatre modules différents de signalisation à DEL. Pour trois des quatre modules, l'appel de courant n'était pas significatif. Cependant, pour le module n° 1, l'appel était près de deux fois celui du courant de fonctionnement normal et le bloc d'alimentation était très bruyant. Afin de s'assurer que les courants de pointe se situe dans une plage normale, nous avons ajouté la phrase suivante dans la spécification d'achat. Nous recommandons également d'inclure cette phrase à l'article 3.2.35 de l'AREMA.

- L'appel de courant (mise en marche) doit être mesuré et spécifié en tant que pourcentage du courant de fonctionnement.

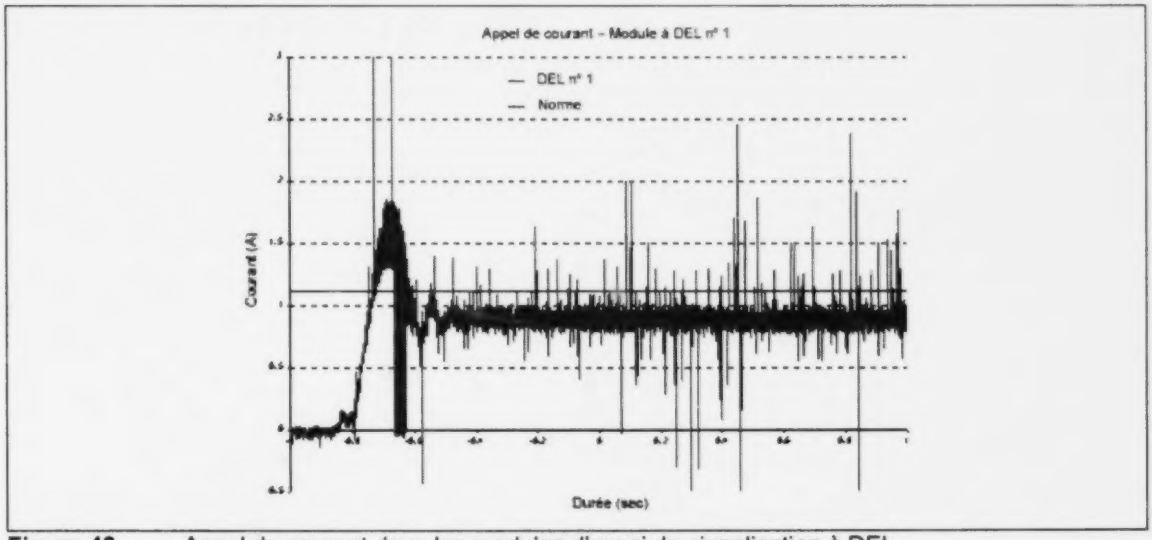


Figure 48 Appel de courant dans les modules d'essai de signalisation à DEL

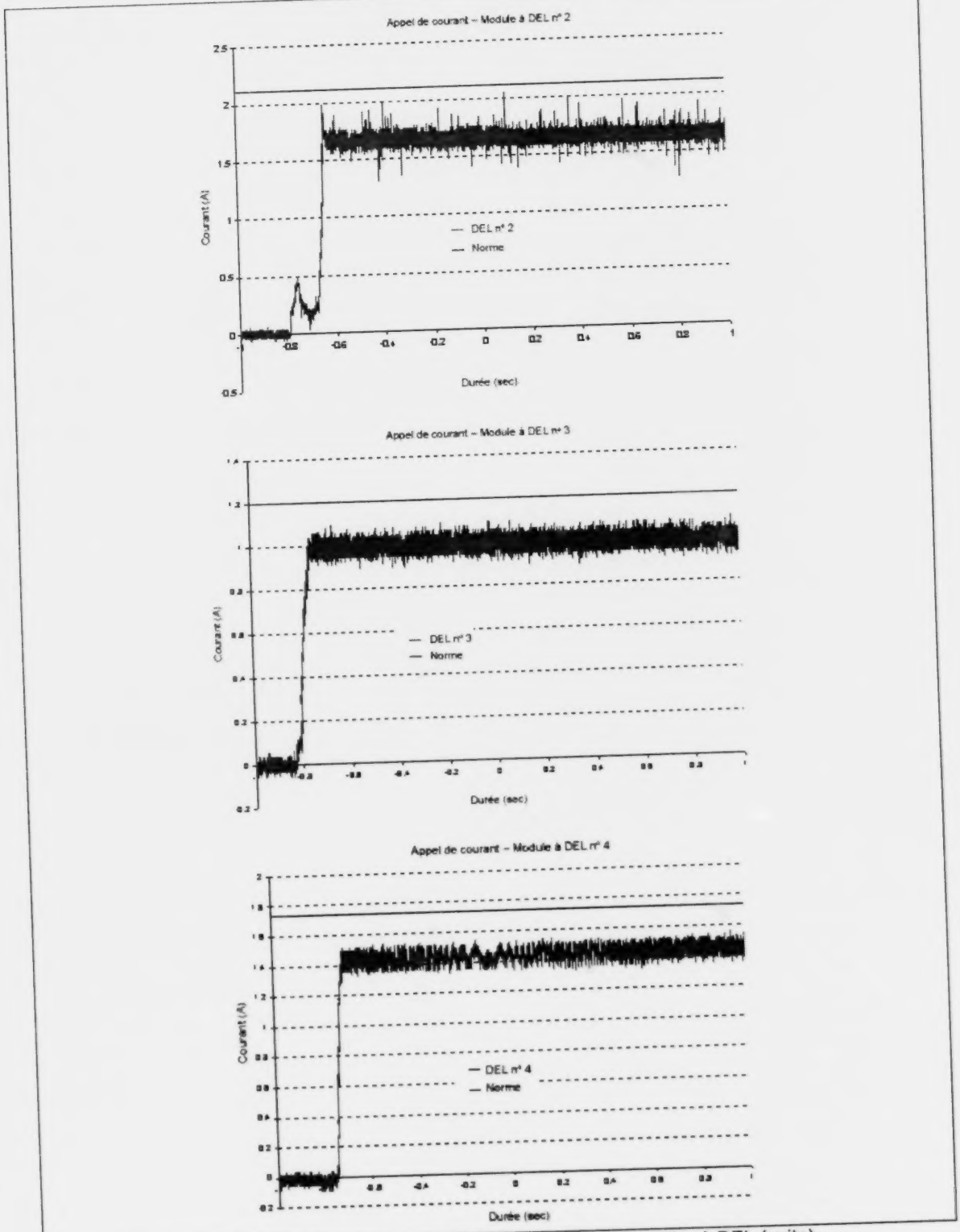


Figure 48 Appel de courant dans les modules d'essai de signalisation à DEL (suite)

13. ASSURANCE DE LA QUALITÉ

Des méthodes d'assurance de la qualité des modules de signalisation doivent être appliquées pour satisfaire aux exigences de la norme. Les spécifications ITE relatives aux modules à DEL (ITE 1998, Section 5) permettent d'appliquer un bon système d'assurance de la qualité. Cependant, ce système n'est pas toujours directement applicable à l'exploitation des modules de signalisation à basse tension aux passages à niveau. Les méthodes d'assurance de la qualité recommandées dans notre spécification d'achat des modules de signalisation à DEL sont modifiées comme suit pour tenir compte des exigences de l'ITE :

13.1 Essai de qualification de la conception

Maintien d'une intensité lumineuse minimale

Nous avons tenté d'énoncer plus clairement les corrections à apporter à la tension, à la température de fonctionnement, à l'exploitation en continu et au vieillissement des DEL pour calculer l'intensité lumineuse «optimale» d'un module de signalisation. L'essai en température est conforme à celui de l'ITE, sauf qu'il a été quelque peu simplifié et que la lumière est mesurée dans l'axe.

13.1.1 Environnement

Cycle thermique

La méthode employée pour l'essai en température est conforme à celle de l'ITE sauf que la plage de température est légèrement réduite pour couvrir de -40 °C à 70 °C° dans le but de nous conformer aux exigences de l'AREMA concernant la plage de température normale.

13.1.2 Alimentation

Courant

Cette spécification est conforme à celle de l'ITE, sauf que le courant est limité à 2 A pour une tension de 8,5 à 14 V. Nous avons imposé un appel de courant de 2 A sur les modules de signalisation en raison du fait que les modules de signalisation aux passages à niveau doivent pouvoir fonctionner à partir d'une batterie pendant des périodes prolongées. L'ITE ne tient pas compte de cet aspect. Nous avons choisi la valeur maximale de 2 A dans le but de nous assurer que le module de signalisation ne consomme pas plus que 20 A à 10 V, ce qui correspond approximativement à la consommation des feux à incandescence couramment utilisés pour la signalisation aux passages à niveau.

Appel de courant

L'appel de courant est calculé pour correspondre à 120 % du courant de fonctionnement normal. Il est inclus dans ce document parce que la complexité des blocs d'alimentation dans les modules de signalisation aux passages à niveau peut entraîner un appel de courant excessif.

Diélectrique

Étant donné que l'ITE n'en fait pas une exigence, cette spécification est tirée de l'article 11.5.1 du manuel de l'AREMA pour les dispositifs de classe B. La question est importante dans les applications visant les chemins de fer puisque les rails constituent des conducteurs pour la foudre.

Insensibilité aux transitoires

Cette spécification est tirée de la partie 11.3.3 du manuel de l'AREMA plutôt que de l'ITE parce que la norme de l'AREMA est plus rigoureuse.

13.2 Essai d'assurance de la qualité de la production

13.2.1 Déverminage

Conforme à l'ITE, à l'exception du clignotement à 60 éclairs/minute.

14. CONCLUSION

Le projet a permis de revoir les normes, tant pour les passages à niveau que pour les routes, les facteurs humains, les besoins des conducteurs automobile, la littérature scientifique ainsi que les commentaires des intervenants. Il a également permis de produire une norme photométrique recommandée pour les feux de signalisation aux passages à niveau ainsi que des spécifications recommandées en regard de la performance environnementale, électrique, physique et mécanique.

La partie la plus importante de cette norme, celle qui est le moins susceptible de changer, est l'exigence photométrique. Celle-ci a été codifiée, «normalisée» et devrait être incluse dans le RT 10 de Transports Canada, Passages à niveau rail-route - *Normes techniques concernant l'inspection, les essais et l'entretien*. Une fois publiée dans le RTD 10, la norme pourra être difficilement modifiée ou mise à jour, ce qui est le résultat attendu puisque les exigences photométriques devraient demeurer inchangées pendant de nombreuses années.

Puisqu'il sera difficile de modifier la norme RTD 10, on se reportera aux manuels de l'AREMA pour apporter des changements résultant de l'évolution technologique. Ainsi, les changements seront apportés dans les manuels et non dans la norme. La partie 3.2.35 du manuel de l'AREMA devra être mise à jour pour y intégrer les exigences proposées. Les principaux aspects qui nécessitent une mise à jour dans la partie 3.2.35 de l'AREMA touchent les exigences photométriques qui devront se rapporter ou satisfaire à la norme RTD 10 ainsi que les exigences électriques. Les changements requis sont présentés sous forme de recommandations à la section 15.

À défaut d'une mise à jour de la partie 3.2.35 de l'AREMA et dans le but de mieux orienter les acheteurs, nous avons également ajouté une spécification d'achat à l'annexe B qui traite en détail des exigences électriques, physiques, mécaniques, environnementales et d'assurance de qualité pour les modules de signalisation à DEL.

15. RECOMMANDATIONS

La norme sur les feux de signalisation à DEL s'inspire de la American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) pour établir les exigences détaillées relatives aux vibrations mécaniques et aux chocs, à la protection contre les surtensions ainsi qu'aux problèmes diélectriques et aux interférences électromagnétiques. Elle s'inspire également de la partie 3.2.35 du manuel de l'AREMA pour décrire les exigences détaillées concernant les circuits d'alimentation des DEL. Cependant, certains éléments de la partie 3.2.35 du manuel doivent être mis à jour afin d'assurer la conformité avec les recommandations découlant de la présente étude. Il s'agit précisément des aspects suivants :

1. La norme exige le maintien de l'intensité lumineuse en tout temps. Tout module de signalisation à DEL qui ne satisfait pas à la norme doit être mis hors service. Par conséquent, la phrase suivante devrait être rayée du manuel :

   Lorsque des DEL sont utilisées comme source lumineuse, l'unité d'éclairement doit être considérée comme défectueuse lorsque plus de 50 % des diodes électroluminescentes sont hors service

2. Il conviendrait d'inclure dans le manuel une exigence de tension de fonctionnement spécifique qui couvrirait toutes les conditions normales de fonctionnement. Cette exigence pourrait se lire comme suit :

   Le module de signalisation à DEL doit fonctionner dans les limites des spécifications pour toutes les tensions susceptibles d'être utilisées pendant l'exploitation normale d'un feu de signalisation à un passage à niveau. Plus précisément, dans le cas des infrastructures existantes comportant des feux de signalisation, le module doit fonctionner dans les limites des spécifications lorsqu'il est alimenté par une source c.a. ou c.c. dans une plage de tension variant entre 8,5 à 14 V.

   Le fabricant doit fournir un graphique de l'intensité lumineuse par rapport à la tension sur une plage de tensions variant entre 0 et 18 V.

3. Le manuel précise que le module de signalisation doit fonctionner à +/- 15 % de la tension nominale de fonctionnement. Étant donné que la tension appliquée peut largement dépasser ce pourcentage, nous recommandons de modifier le texte de la façon suivante :

   Le module de signalisation à DEL doit être conçu de façon à ne pas être endommagé par une surtension modérée. Plus précisément, pour une infrastructure courante de passage à niveau, le module doit demeurer en fonctionnement lorsqu'il est alimenté par une source c.a. ou c.c. pouvant atteindre 18 V.

4. Afin de s'assurer que la consommation de courant d'un module de signalisation à DEL n'est pas excessive, nous proposons d'ajouter l'exigence suivante :

   Le module de signalisation à DEL ne doit pas consommer plus de 2 A sur toute la plage des tensions susceptibles d'être appliquées dans le cadre de l'exploitation normale d'un module de signalisation à un passage à niveau. Le fabricant doit fournir un graphique de la consommation de courant par rapport à la tension, dans la plage de 0 à 18 V.

5. Afin de s'assurer que les appels de courant nécessaires à la mise en marche des feux de signalisation à DEL ne dépassent pas les critères de conception de courant maximum aux passages à niveau, nous proposons d'ajouter la phrase qui suit :

   L'appel de courant (mise en marche) doit être mesuré et spécifié en tant que pourcentage du courant de fonctionnement.

6. Afin de s'assurer que les modules de signalisation à DEL fonctionnent efficacement sur toute la plage des exigences relatives à la température, nous recommandons d'inclure dans le manuel une exigence précisant que le fabricant fasse la preuve du bon fonctionnement du système sur toute la plage de température (-40°C à 70°C) et qu'il fournisse un graphique indiquant les valeurs de sortie de source lumineuse dans la plage de températures de -40°C à 70°C°, à la tension nominale de fonctionnement.

BIBLIOGRAPHIE

- AAR. 1996. *Manual Part 3.2.37. AAR Signal Manual: Recommended Design Criteria for a Light Unit for Highway Grade Crossing Signal Using LEDs for Retrofitting Existing Lamp Housings.*
- AAR Proceedings. 1996. *Panel Discussion on Light Emitting Diodes.*
- Adrian, W. 1963. *Lichttechnik 15, 115.* Tel que cité par Cole et Brown (1966).
- Application Brief I-004. 1999. *Reliability of Precision Optical Performance AlInGaP LED Lamps in Traffic Signals and Variable Message Signs.* Agilent Technologies.
- Application Brief I-007. 1999. *Projection of Long Term Light Output Performance for AS AlInGaP LED Technology.* Agilent Technologies.
- Application Brief I-009. 1999. *Visible LED Devices and Eye Safety with Respect to MOE Values as Defined in the European Standard IEC 825-1.* Agilent Technologies.
- Application Brief I-018. 1999. *Projected Term HTOL Light Output Degradation of Precision Optical Performance AlInGaP LEDs.* Agilent Technologies.
- Application Brief I-024. 1999. *Pulsed Operated Ranges for AlInGaP LEDs vs. Projected Long Term Light Output Performance.* Agilent Technologies.
- Application Brief SO1. 2000. *High-Flux LED Based Traffic Signal Reliability.* LumiLeds.
- Application Note 1149-4. 2000. *Thermal Management Considerations for Super Flux LEDs.* LumiLeds.
- Application Note 1155-3. 1998. *LED Stop Lamps Help Reduce the Number and Severity of Automobile Accidents.* Page Web de Hewlett-Packard.
- AREMA. 1996. *Manual Part 11.3.3. AREMA C&S Manual: Design Criteria for Surge Withstand Capability of Electronic Signal Equipment for Signal Systems Revised 1996.*
- AREMA. 1997. *Manual Part 11.5.1. AREMA C&S Manual: Recommended Environmental Requirements for Electrical and Electronic Railroad Signal System Equipment Revised 1997.*
- AREMA. 1998. *Manual Part 7.1.10. AREMA C&S Manual: Recommended Design Criteria and Functional/Operating Guidelines for Signal Roundels, Lenses, Discs and Cones Reaffirmed 1998.*
- AREMA. 1999. *Manual Part 3.1.28. AREMA C&S Manual: Recommended Standby Battery Requirements for Highway-Rail Grade Crossing Warning Systems Revised 1999.*
- AREMA. 1999. *Manual Part 3.2.35. AREMA C&S Manual: Recommended Design Criteria for Electric Light Unit for Highway-Rail Grade Crossing Signals Including LEDs and Incandescent Lamps.*
- AREMA. 1999. *Manual Part 14.2.1. AREMA C&S Manual: Recommended Design Criteria and Functional/Operating Guidelines for Incandescent Electric Lamps Revised 1999.*
- AREMA. 2000. *Manual Part 3.2.40. AREMA C&S Manual: Recommended Design Criteria for Electric Light Unit for Highway-Rail Grade Crossing Gate Arm Revised 2000.*
- AREMA. 2001. *Manual Part 3.2.35. AREMA C&S Manual: Recommended Design Criteria for Electric Light Unit for Highway-Rail Grade Crossing Signals Including Light Emitting Arrays and Incandescent Lamps Revised 2002.*
- Association internationale de signalisation maritime (AISM). 1974. *Recommendation for a Definition of the Nominal Daytime Range of Maritime Signal Lights Intended for the Guidance of Shipping by Day.* Extrait du bulletin 60-1974-3 de l'AISM.

- Association internationale de signalisation maritime (AISM). 2001. *Standard for the Photometry of Marine Aids-to-Navigation Signal Lights*. Ébauche.
- Association of American Railroads. *Highway-Rail Grade Crossing Safety*. Reproduction d'une page Web. 2001.
- Australian Traffic Standard. 1995. *AS 2144-1995 Traffic Signal Lanterns*. Standards Australia.
- Balthazar, Dominic. Chef de produit, GELcore. Communication personnelle. 2001.
- Bernd, Girod. *Course Notes on Image and Video Compression*. Université Stanford. www.stanford.edu/class/ee368b/Handouts/09-HumanPerception.pdf. Reproduction d'une page Web. 2002.
- Bierman, Andrew. 1998. *LEDs: from Indicators to Illumination*. Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute.
- Blackwell, O.M. 1970. Visual performance, effects of age. Rapport annuel de l'IERI.
- Boisson, H. et Pages, R. 1964. Compte rendu, Quinzième session, Vienne (Publication 11D de la CIE). Tel que cité par Cole et Brown (1966).
- Brackett, Peter. 1996. LED Flashing Crossing Light Report.
- Bullough, John D. 2000. *Optimizing the Design and Use of Light-Emitting Diodes for Visually Critical Applications in Transportation and Architecture: Research Issues and Options*. Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute. http://www.lrc.rpi.edu/ltgtrans/led/led-tech.html.
- Bullough, John D. *et al.* 1999. *Luminous Intensity for Traffic Signals: A Scientific Basis for Performance Specifications*. Lighting Research Centre, Rensselaer Polytechnic Institute.
- Bullough, John D. *et al.* 2000. *Response to Simulated Traffic Signals Using Light-Emitting Diode and Incandescent Sources*. Transportation Research Record 1724, Paper No. 00-1474.
- Bullough, John D. *et al.* 2001. *Traffic Signal Luminance and Visual Discomfort at Night*. Paper No. 01-2574, Transportation Research Record 1754. Transportation Research Board. Washington, D.C.
- Careaga, Anika et Allen, Tom pour MoDOT. 2000. Final Report RDT 99-010. *Light Emitting Diode (LED) Signal Installation*. Research Investigation 96-023.
- Cheeks, James. Comité de l'ITE. Communication personnelle. 2002.
- Chemin de fer Canadien Pacifique. Circulaire sur les méthodes normalisées - S&C n° 3. 1996. *Roundel selection and Alignment procedure for road crossing light units.*
- Chemin de fer Canadien Pacifique. Circulaire sur les méthodes normalisées - S&C n° 9. 1996. *Rules and Instructions for Maintenance, Inspection and Testing of Highway/Railway Grade Crossing Warning Systems-Canada.*
- CIE, Pub. n° 48. Commission internationale de l'éclairage. 1980. *Signaux lumineux de contrôle de la circulation routière*. (TC-1.6). CIE, Comité technique 1.6.
- CIE, Pub. n° 79. Commission internationale de l'éclairage. 1988. *Rapport technique : Guide pour l'établissement des projets de feux de circulation routière*.
- Clark, B.A.J. 1968. *Effects of tinted ophthalmic media on the recognition of red traffic signals*. Proc. Aust. Rd Res. Vol. 4, no. 1.
- CN Alignment Criteria. 1997. Standards and Quality Assurance, Signals and Communications. *Road Crossing Warning Device LED Type Light Unit Alignment Criteria – Test Report.*

- CN, Codes de pratiques. 2000. *Cantilever Type Signal Structures and Flashing Light Signal Requirements at Road Crossing Warning Systems.*
- CN General Instructions. 1996. *Testing Highway Grade Crossing Warning Devices.*
- Coghlan, Mike. 1999. *Evaluation of Light Emitting Diodes for Grade Crossing Warning Systems.* File: ASRE 3566-10-38.
- Cohn, Theodore E. *et al.* 1996. *As AlInGaP Red 12" LED Signal Characteristics - Interim Report.* Visual Detection Laboratory, Université de Californie. Berkeley (Californie).
- Cohn, Theodore E. *et al.* 1998. *Alternative Traffic Signal Illumination.* Institute of Transportation Studies, Université de Californie. Berkeley (Californie).
- Cole, Barry L. et Brown, Brian. 1966. *Optimum Intensity of Red Road-Traffic Signal Lights for Normal and Protanopic Observers.* Journal of the Optical Society of America, v. 56, no. 4.
- Cole, Barry L. et Brown, Brian. 1968. *Specification of Road Traffic Signal Light Intensity.* Human Factors, 10 (3).
- Coleman, Fred III *et al.* 1996. *Conspicuity Comparison of Incandescent Railroad Grade Crossing Signals and Light Emitting Diodes (LED) Railroad Grade Crossing Signals.* Engineering Open House – Université de l'Illinois.
- Conners, M.M. 1975. Conspicuity target lights: the influence of flash rate and brightness N.A.S.A. Technical Note, TND-7961.
- Corbin, John *et al.* 1995. *Requirements for Application of Light Emitting Diodes (LEDs) to Traffic Control Signals.* Final Report (Project 5-12). Transportation Research Board - National Research Council. Washington, D.C.
- Course Notes on Human Vision. Texas A&M University. Based on material from Gonzales and Wintz. Digital Image Processing. Addison-Wesley. 1977.
- Craford, George M. *et al.* 2001. *Les diodes éclairent le futur.* Pour la science.
- De Lorenzo, Robert A., MD, EMT-P; Eilers, Mark A., MD, FACEP. 1991. *Lights and Siren: A Review of Emergency Vehicle Warning Systems.* Annals of Emergency Medicine. www.naemd.org/articles/warningsystems1.htm.
- Department of Transportation. État de Californie. *Purchase Specification Light Emitting Diode (LED) Signal Modules (RED).* Reproduction d'une page Web. 2001. http://www.dot.ca.gov/hq/traffops/elecsys/led/RedLEDSPEC3.html.
- Durgin, Gary. Dialight Corporation, USA. 1998. *Traffic Technology International. Annual Review '98. pages 178-180.*
- Eklund, Neil H. 1999. *Exit Sign Recognition for Color Normal and Color Deficient Observers.* Journal of the Illuminating Engineering Society.
- Epilepsy Toronto, page Web : http://www.epilepsytoronto.org/people/eaupdate/vol9-3.html.
- Evans, Scott. 1997. *Incompatibility of LED Signal Modules with Existing Load Switches and Conflict Monitors.* Note adressée aux membres du comité de travail sur les DEL de l'ITE.
- Federal Highway Administration, page Web : http://mutcd.fhwa.dot.gov/kno-faq_atssaconf.htm
- Ferrer-Roca, O. *Annex IV: Colour Theory.* Université La Laguna. Tenerife, Îles Canaries. Espagne. Reproduction d'une page Web. 2001. www.redkbs.com/catai/annex4.htm.
- FHWA-RD-77-167. 1977. *Motorists' Requirements for Active Grade Crossing Warning Devices.* Federal Highway Administration.
- Fisher, A. 1969. *A Photometric Specification for Vehicular Traffic Signal Lanterns, Parts 1 & 2: Luminous Intensity Necessary for the Detection of Signals.* Research Project 207, Department of Motor Transport, New South Wales.

- Fisher, A. 1971. *A Photometric Specification for Vehicular Traffic Signal Lanterns, Part 3: The Necessary Limitation of Sun Phantom*. Department of Motor Transport, New South Wales.
- Fisher, A. et Cole, B.L. 1974. *The Photometric Requirements of Vehicular Traffic Signal Lanterns*. ARRB Proceedings, Volume 7, Partie 5.
- Fisher, A. et Millard, I. 1971. *The efficiency of anti sun phantom devices in traffic signals*. University of New South Wales.
- Gerathewohl, S. 1957. *Conspicuity of flashing light signals: effects of variation among frequency, duration and contrast of the signals*. J. Opt. Soc. Am., 47. pp. 27-29.
- Harding, G.F.A. 1998. *Photosensitive Epilepsy*, Volume 9, numéro 3.
- Harding, G.F.A. & Jeavons, P.M. 1994. *Photosensitive Epilepsy*. MacKeith Press, London.
- Highways Agency, Department of Transportation – Traffic Systems and Signing. January 1998. *Draft – Optical Requirements for LED Signal Optics*.
- Hopkins, J.B. et Holmstrom, F.R. 1976. *Toward more effective grade crossing flashing lights*. Transportation Research Record, 562. Transportation Research Board, National Research Council, pp. 1-14.
- Hulscher, F.R. 1974. *Practical Implementation of Performance Objectives for Traffic Light Signals. Paper No. A15*. Australian Road Research Board (ARRB) Proceedings, Vol. 7, Partie 5.
- Hulscher, F.R. 1975. *Photometric Requirements for Long-Range Road Traffic Light Signals*. Australian Road Research Board (ARRB), Vol. 5, n° 7.
- Institute of Transportation Engineers. 1998. *Equipment and Material Standards. Chapter 2: Vehicle Traffic Control Signal Heads*. Washington, D.C.
- Institute of Transportation Engineers. 1998. *Equipment and Material Standards. Chapter 2a: VTCSH Part 2: Light Emitting Diode (LED) Vehicle Signal Modules (Interim)*. Washington, D.C.
- Jainski, P. et Schmidt-Clausen, J. 1967. *The Effect of Intensity on the Perception of Colored Signal Lights*. Lichttechnik, 19 (1). Tel que cité par Staplin, Loren *et al.* (1997).
- Janoff, Michael S. 1990. *Review of Traffic Signal Intensity Standards, Final report*. National Cooperative Highway Research Project, Program Report 256, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Janoff, Michael S. 1990. *Review of Traffic Signal Intensity Standards, Project 20-7, Task 35, Final Report*. National Cooperative Highway Research Project. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Janoff, Michael S. 1991. *Traffic Signal Visibility: A Preliminary Standards for Rounds Signal Indications Derived from Scientific Research*. Transportation Research Record 1316.
- Kacir, Kent C. *et al.* 1995. *Guidelines for the Use of Flashing Operation at Signalized Intersections*. ITE Journal.
- Lewin, I. *et al.* 1997. *The Application of Light Emitting Diodes to Traffic Signals*. Journal of the Illuminating Engineering Society.
- McKnight, Robert W. 1999. *Highway-Rail Grade Crossing Warning Systems*. Note adressée aux membres du comité 36D de l'AREMA. Rochester (New York).
- MCSR. 1998. *Manuel canadien de la signalisation routière. Partie B – Signaux lumineux. Division 3 : Installation et affichage*. Comité national de la signalisation routière.

- NCHRP 5-15. Westat, Inc., Rockville (Maryland). 1997. *Visibility Performance Requirements for Vehicular Traffic Signals - Task 1 Report: Literature Review*. National Research Council, Transportation Research Board. Washington, D.C.
- NCHRP 5-15. Westat. 2001: *Visibility Performance Requirements for Vehicular Traffic Signals*, Revised Final Report. Transportation Research Board.
- Norme européenne – Compatibilité électromagnétique. Novembre 1998. *PrEN 50293, Rev. B, Compatibilité électromagnétique – Systèmes de signaux de circulation routière – Norme de produit*. CENELEC.
- Norme européenne. *EN 12368-2000 (D,E,F) Équipement de régulation du trafic – Têtes de feu*. Comité européen de normalisation. 2000.
- Norwegian National Coastal Administration. 2000. *Short and Medium Range Light Emitting diode (LED) Lantern for Aids to Navigation*. Ports, phares et pilotage.
- Pezoldt, V.J. *et al.* 1997. *The Use of Light Emitting Diode Arrays for Grade Crossing Warning Lights*. Texas Transportation Institute for AAR. The Texas A&M University System, College Station (Texas).
- Projet RTD 10, Passages à niveau rail-route. 2000. *Normes techniques concernant l'inspection, les essais et l'entretien. Partie B – Normes de conception*. Projet. 7 mars 2002. Transports Canada.
- Projet RTD 10, Passages à niveau rail-route. 2000. *Normes techniques concernant l'inspection, les essais et l'entretien. Partie C – Exigences techniques concernant les systèmes d'avertissement de passage à niveau*. Avant-projet. 7 mars 2002. Transports Canada.
- PTI Urban Consortium Energy Task Force. 1996. *Final Report - Standard Specifications for LED Traffic Signals*. Ville de Philadelphie.
- Quesnel, Sandy. B.C. Ministry of Highways. Communication personnelle. 2002.
- Rheingans, Penny. Color Perception and Applications. Université du Maryland, Baltimore County. Reproduction d'une page Web. 2001. www.cs.umbc.edu/~rheingan/SIGGRAPH/color.slides.pdf
- Road Research Laboratory, Angleterre. Rapport non publié cité par Cole et Brown, 1966.
- Rutley, K.S., Christie, A.W. et Fisher, A.J. 1965. *Photometric Requirements for Traffic signals. I. Peak Intensities*. TRRL LN/729.
- Savage, Neil. 2000. *LEDs Light the Future*. Technology Review.
- Sharkey, John. Safetran. Communication personnelle. 2001-2002.
- Silicon Graphics Computer Systems. http://www.sgi.com/products/legacy/displays.html.
- Sivak, Michael et al. 1993. *Reaction Times to Neon, LED, and Fast Incandescent Brake Lamps*. The University of Michigan Transportation Research Institute. Ann Arbor (Michigan).
- Snee, Ronald W. Safetran Systems Corp. 1996. *LED Flashing Light Signals*. AAR Committee Reports & Technical Papers.
- Staplin, Loren *et al.* 1997. *Synthesis of Human Factors Research on Older Drivers and Highway Safety. Volume II: Human Factors and Highway Safety Research Synthesis: Traffic Control Devices and Driver Performance*. Publication No. FHWA-RD-97-095. Office of Safety and Traffic Operations R&D. Federal Highway Administration, McLean (Virginie).
- Sullivan, Darcy T. *et al.* 1997. *Selection of Light Output Requirements for the Proposed Interim Purchase Specification for LED Traffic Signal Modules*. Ébauche. Groupe de consultation de l'ITE.

- Tansley, Brian W. 1988. *Alternative Level Crossing Warning Signals for Increased Visual Conspicuity: An Investigation of Designs Using High-Brightness Light Emitting Diodes.* Centre de développement des transports, Montréal (Québec).
- Transportation Research Board. 2001. *Traffic Control Devices, Visibility and Rail-Highway Grade Crossings.* Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board No. 1754.
- Transports Canada. Commission canadienne des transports. Règlement sur la protection des devis d'installation et d'essai aux passages à niveau. *Loi nationale sur les transports, Loi sur les chemins de fer.* Ordonnance générale E-6. *Règlement concernant les appareils de protection aux passages à niveau et les devis d'installation et d'essai.* Reproduction d'une page Web. 2001.
- Transports Canada. 1996. *Faits ferroviaires. 1996. Accidents aux passages à niveau – Sept. 1996.* www.tc.gc.ca/railway/FRENCH/CROSS_F/CROSSFR_1.htm.
- Transports Canada. 1998. *Les transports au Canada – Rapport annuel, 1998.* www.tc.gc.ca/lois-reglements/menu.htm
- U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration. 1999. *Improving Railroad Safety and Rail Passenger Technology through Targeted Research and Demonstrations 1992-1997.* Office of Railroad Development. Washington, D.C.
- Van Alstine, Dan. 1995. *Incandescent-LED: Light Output Comparison.* General Railway Signal Corporation, Rochester (New York).
- Visual Expert, page Web. *Reaction Time.* http://www.visualexpert.com/Resources/reactiontime.html
- Wyle Laboratories. 1997. *Background, Comments, and Analysis on Solar Temperature Study of 8-inch and 12-inch Traffic Signals.* Huntsville (Alabama).
- Whillans, M.G. et Allen, M.J. 1992. Color Defective Drivers and Safety. Optometry and Visual Sciences, 69(6), 463-266.

ANNEXE A
TEXTE INTÉGRAL DE LA NORME RECOMMANDÉE

NORME DE TRANSPORTS CANADA SUR LES MODULES DE SIGNALISATION À DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES (DEL) DE PASSAGES À NIVEAU RAIL-ROUTE

OBJET

Cette norme a pour objet de fixer les exigences de performance minimale pour les modules de signalisation à DEL de 200 et 300 mm utilisés aux passages à niveau rail-route au Canada.

DÉFINITIONS

Candela (cd) – Unité SI d'intensité lumineuse. Le candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique d'une fréquence de 540 nm et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de 1/683 W par stéradian (1 cd = 1 Lm/sr).

Chromaticité – Couleur de la lumière émise par un feu à DEL, qui est spécifiée par les coordonnés chromatiques x et y du diagramme de chromaticité de l'espace des couleurs de la Commission internationale de l'éclairage (CIE) de 1931.

Coefficient d'utilisation – Fraction d'une période de temps donnée durant laquelle un feu à DEL est sous tension, exprimée en pourcentage (p. ex., 30 minutes par heure correspondrait à un coefficient d'utilisation de 50 %).

Dégradation à long terme de l'intensité lumineuse – Réduction de l'intensité lumineuse qui se produit normalement quand une DEL est allumée durant une période de temps prolongée.

Déverminage – Opération par laquelle un module de signalisation à DEL est mis sous tension à une température ambiante pour une durée spécifiée afin de causer toute défaillance précoce des composants électroniques et de détecter tout problème de fiabilité des composants avant de livrer le produit à l'utilisateur en vue de son installation.

Durée (de vie) nominale – Moyenne arithmétique des durées de vie sous tension d'un certain nombre de modules de signalisation pris comme échantillons et utilisés à la tension nominale dans des conditions de fonctionnement définies.

Éclairement (en un point d'une surface) – Flux lumineux $d\Phi_v$ incident sur un élément de la surface contenant ce point, divisé par l'aire dA de cet élément (candela-pied, lux).

Efficacité lumineuse d'une source – Le flux lumineux émis par la source divisé par la puissance consommée par la source.

Efficacité lumineuse du rayonnement (K) – Le flux lumineux Φ_v divisé par le flux radiant correspondant Φ_e ($K = \Phi_v/\Phi_e$).

Efficacité lumineuse spectrale – Rapport entre le flux radiant à la longueur d'onde λ_m et le flux radiant à la longueur d'onde λ tel que les deux rayonnements produisent des sensations lumineuses d'égales intensités dans des conditions photométriques spécifiées, λ_m étant choisie de façon que la valeur maximale de ce rapport soit égale à 1.

Feu de signalisation de passage à niveau – Partie d'un système d'avertissement de passage à niveau qui produit un avertissement visuel pour les véhicules.

Flux lumineux (Φ_v) – Quantité dérivée du flux radiant Φ_e en évaluant le rayonnement d'après l'effet produit sur l'observateur standard de la CIE (lumen).

Flux radiant (Φ_e) – Puissance totale mesurée en watts qui est émise, reçue ou retransmise sous la forme d'un rayonnement électromagnétique.

Intensité lumineuse (d'une source dans une direction donnée, I_v) – Le flux lumineux $d\Phi_v$ émis par la source et se propageant dans l'élément d'angle solide $d\Omega$ contenant la direction donnée, divisé par l'élément d'angle solide ($I_v = d\Phi_v/d\Omega$ candela).

Lumen (Lm) – Unité SI de flux lumineux : flux lumineux émis par unité d'angle solide [stéradian (sr)] par une source ponctuelle uniforme ayant une intensité lumineuse de 1 candela (1 Lm = 1 cd x 1 sr).

Luminance (dans une direction donnée, en un point donné d'une surface réelle ou imaginaire, L_v) – Quantité définie par la formule

$$L_v \quad \frac{d\Phi_v}{dA \cdot d\Omega \cdot \cos\theta}$$

où $d\Phi_v$ est le flux lumineux transmis par un faisceau élémentaire passant par le point donné et se propageant dans l'angle solide $d\Omega$ contenant la direction donnée, dA est l'aire d'une section de ce faisceau contenant le point donné, et θ est l'angle entre la normale à cette section et la direction du faisceau (lambert-pied, cd/m^2).

Lux (lx) – Unité SI d'éclairement : éclairement produit sur une surface d'un mètre carré par un flux lumineux d'un lumen réparti uniformément sur cette surface ($1\ lx = 1\ Lm/m^2$).

Module de signalisation à DEL – Réseau de DEL associé à une lentille qui peut produire un signal lumineux circulaire. Un module de signalisation à DEL doit pouvoir remplacer l'unité optique d'un feu de passage à niveau rail-route actuel.

Procédure de stabilisation de la lumière – Procédure par laquelle on excite un module de signalisation à DEL à une température donnée et durant une période spécifiée pour stabiliser l'intensité lumineuse.

Puissance consommée – Puissance en watts consommée par un module de signalisation à DEL utilisé sous une tension de fonctionnement nominale dans une gamme de températures de fonctionnement ambiantes.

Puissance nominale – Puissance initiale moyenne (en watts) consommée quand le feu est utilisé à la tension nominale.

Source à DEL – Diode électroluminescente (DEL) unique ou réseau de DEL.

Tension nominale – Tension de fonctionnement nominale ou prévue pour le module de signalisation à DEL; tension à laquelle sont déterminées les valeurs nominales de la puissance, de l'intensité lumineuse et de la durée de vie.

EXIGENCES PHOTOMÉTRIQUES

Intensité lumineuse

Les modules de signalisation à DEL utilisés aux passages à niveau doivent en tout temps et dans toutes les conditions de fonctionnement normales avoir les intensités lumineuses minimales indiquées au tableau A-1.

Tableau A-1 – Intensité lumineuse minimale (candelas) sur la gamme de températures de fonctionnement et durant leur durée de vie

	0°	***5° G/D***	***10° G/D***	***15° G/D***	***20° G/D***	***25° G/D***	***30° G/D***
0°	400	375	250	150	75	40	15
5° B	350	325	250	150	75	40	15
10° B	130	125	110	85	60	35	15
15° B	45	40	35	30	25	20	15
20° B	15	15	15	15	15	15	10

Chromaticité

Un module de signalisation doit produire une lumière rouge uniforme conforme à la norme *Equipment and Material Standards* (1998), chapitre 2, section 8.04 de l'Institute of Transportation Engineers (ITE).

Uniformité

Le rapport de la luminance la plus forte à la luminance la plus faible sur le module de signalisation ne doit pas dépasser 5:1 sur des surfaces moyennes de 500 mm^2.

Temps de montée et de descente

Le temps de monté maximal entre zéro et l'intensité maximale, et le temps de descente maximal entre l'intensité maximale et zéro doivent être de 75 ms.

EXIGENCES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

Conception du module de signalisation à DEL

Un module de signalisation à DEL doit être conçu pour remplacer le support, le réflecteur et la lentille du module de signalisation actuel dans les boîtiers de signalisation de passage à niveau sans nécessiter de modification des éléments mécaniques, structurels ou électriques de ces boîtiers, qui sont décrits dans le manuel de l'AREMA, partie 3.2.35 (*Recommended Design Criteria for Electric Light Unit for Highway-Rail Grade Crossing Signals Including Light Emitting Arrays and Incandescent Lamps*).

Le module de signalisation à DEL peut mesurer 200 ou 300 mm, et peut inclure une lentille incolore ou rouge.

Tout joint ou dispositif d'étanchéité similaire doit être fait de matériaux conformes aux spécifications du manuel de l'AREMA, partie 15.2.10 (*Recommended Functional Guidelines for Gasket Material Suitable for Circuit Controllers, Signal Cases and Other Signal Apparatus Housings*).

Exigences environnementales

Le module de signalisation à DEL doit fonctionner dans une gamme de températures ambiantes allant de -40 °C (-40 °F) à 70 °C (158 °F), conformément à la méthode de test 1010 de la norme MIL-STD-883.

Le module de signalisation à DEL doit être protégé contre la poussière et l'humidité, conformément aux exigences de la norme NEMA 250-1991, sections 4.7.2.1 et 4.7.3.2 pour les boîtiers de type 4.

Le module de signalisation à DEL doit satisfaire aux exigences de protection contre les vibrations et les chocs mécaniques du manuel de l'AREMA, partie 11.5.1 (*Recommended Environmental Requirements for Electrical and Electronic Railroad Signal System Equipment*).

Le module de signalisation à DEL doit être stabilisé contre les ultraviolets.

Identification

Le module de signalisation à DEL doit porter l'information suivante de façon bien visible :

Passage à niveau : DEL, rouge
Classification de déviation du faisceau : Universelle
Tension de fonctionnement : _____
Courant débité sous la tension de fonctionnement : _____
Conforme aux spécifications de Transports Canada : 2002
Numéro de série : _____
Date de fabrication : _____

Si le module ou ses éléments doivent être installés avec une orientation particulière, celle-ci doit être indiquée de façon permanente par une flèche bien en vue.

EXIGENCES ÉLECTRIQUES

Protection contre les tensions transitoires

Les circuits du module de signalisation à DEL doivent être protégés contre les surtensions, conformément aux spécifications du manuel de l'AREMA, partie 11.3.3 (*Recommended Design Criteria for Surge Withstand Capability of Electronic Signal Equipment for Signal Systems*).

Circuit d'alimentation des DEL

Le circuit d'alimentation du module de signalisation à DEL doit fonctionner conformément aux spécifications du manuel de l'AREMA, partie 3.2.35 (*Recommended Design Criteria for Electric Light Unit for Highway-Rail Grade Crossing Signals Including Light Emitting Arrays and Incandescent Lamps*).

Interférences diélectriques et électromagnétiques

Les circuits du module de signalisation à DEL doivent être conformes aux exigences de protection contre les interférences électriques et électromagnétiques pour l'équipement de classe B qui sont spécifiées dans le manuel de l'AREMA, partie 11.5.1 (*Recommended Environmental Requirements for Electrical and Electronic Railroad Signal System Equipment*).

EXIGENCES D'ASSURANCE DE LA QUALITÉ

Le module de signalisation à DEL doit être fabriqué conformément au programme d'assurance de la qualité du fournisseur. Ce programme doit comporter deux types d'assurance de la qualité :

- une assurance de la qualité de conception, et
- une assurance de qualité de fabrication.

Le programme d'assurance de la qualité de conception doit garantir que les exigences d'intensité lumineuse de cette spécification sont satisfaites dans toutes les conditions de fonctionnement normales et durant toute la durée d'installation du produit, et que les exigences physiques, mécaniques et électriques de la spécification sont satisfaites également.

L'assurance de la qualité de fabrication doit comporter des tests périodiques statistiquement contrôlés visant à garantir que chaque module de signalisation à DEL est conforme aux spécifications de conception.

ANNEXE B
SPÉCIFICATION D'ACHAT

SPÉCIFICATION D'ACHAT POUR MODULES DE SIGNALISATION À DEL DE PASSAGES À NIVEAU RAIL-ROUTE

OBJET

Cette spécification d'achat a pour objet de fixer des exigences détaillées en matière de performance et d'assurance de la qualité pour les modules de signalisation à diodes électroluminescentes (DEL) de 200 et 300 mm utilisées dans les feux de passage à niveau rail-route.

Elle vise à aider les acheteurs de modules de signalisation à DEL pour passages à niveau, et à imposer des restrictions sur des modèles et des matériaux spécifiques. Elle est applicable aux modules de signalisation à DEL achetés après juillet 2002.

DÉFINITIONS

Candela (cd) – Unité SI d'intensité lumineuse. Le candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique d'une fréquence de 540 nm et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de 1/683 W par stéradian (1 cd = 1 Lm/sr).

Chromaticité – Couleur de la lumière émise par un feu à DEL, qui est spécifiée par les coordonnés chromatiques x et y du diagramme de chromaticité de l'espace des couleurs de la Commission internationale de l'éclairage (CIE) de 1931.

Coefficient d'utilisation – Fraction d'une période de temps donnée durant laquelle un feu à DEL est sous tension, exprimée en pourcentage (p. ex., 30 minutes par heure correspondrait à un coefficient d'utilisation de 50 %).

Dégradation à long terme de l'intensité lumineuse – Réduction de l'intensité lumineuse qui se produit normalement quand une DEL est allumée durant une période de temps prolongée.

Déverminage – Opération par laquelle un module de signalisation à DEL est mis sous tension à une température ambiante pour une durée spécifiée afin de causer toute défaillance précoce des composants électroniques et de détecter tout problème de fiabilité des composants avant de livrer le produit à l'utilisateur en vue de son installation.

Durée (de vie) nominale – Moyenne arithmétique des durées de vie sous tension d'un certain nombre de modules de signalisation pris comme échantillons et utilisés à la tension nominale dans des conditions de fonctionnement définies.

Éclairement (en un point d'une surface) – Flux lumineux $d\Phi_v$ incident sur un élément de la surface contenant ce point, divisé par l'aire dA de cet élément (candela-pied, lux).

Efficacité lumineuse d'une source – Le flux lumineux émis par la source divisé par la puissance consommée par la source.

Efficacité lumineuse du rayonnement (K) – Le flux lumineux Φ_v divisé par le flux radiant correspondant Φ_e ($K = \Phi_v/\Phi_e$).

Efficacité lumineuse spectrale – Rapport entre le flux radiant à la longueur d'onde λ_m et le flux radiant à la longueur d'onde λ tel que les deux rayonnements produisent des sensations lumineuses d'égales intensités dans des conditions photométriques spécifiées, λ_m étant choisie de façon que la valeur maximale de ce rapport soit égale à 1.

Feu de signalisation de passage à niveau – Partie d'un système d'avertissement de passage à niveau qui produit un avertissement visuel pour les véhicules.

Flux lumineux (Φ_v) – Quantité dérivée du flux radiant Φ_e en évaluant le rayonnement d'après l'effet produit sur l'observateur standard de la CIE (lumen).

Flux radiant (Φ_e) – Puissance totale mesurée en watts qui est émise, reçue ou retransmise sous la forme d'un rayonnement électromagnétique.

Intensité lumineuse (d'une source dans une direction donnée, I_v) – Le flux lumineux $d\Phi_v$ émis par la source et se propageant dans l'élément d'angle solide $d\Omega$ contenant la direction donnée, divisé par l'élément d'angle solide ($I_v = d\Phi_v/d\Omega$ candela).

Lumen (Lm) – Unité SI de flux lumineux : flux lumineux émis par unité d'angle solide [stéradian (sr)] par une source ponctuelle uniforme ayant une intensité lumineuse de 1 candela (1 Lm = 1 cd x 1 sr).

Luminance (dans une direction donnée, en un point donné d'une surface réelle ou imaginaire, L_v) – Quantité définie par la formule

$$L_v \quad \frac{d\Phi_v}{dA \cdot d\Omega \cdot \cos\theta}$$

où $d\Phi_v$ est le flux lumineux transmis par un faisceau élémentaire passant par le point donné et se propageant dans l'angle solide $d\Omega$ contenant la direction donnée, dA est l'aire d'une section de ce faisceau contenant le point donné, et θ est l'angle entre la normale à cette section et la direction du faisceau (lambert-pied, cd/m^2).

Lux (lx) – Unité SI d'éclairement : éclairement produit sur une surface d'un mètre carré par un flux lumineux d'un lumen réparti uniformément sur cette surface ($1 lx = 1 Lm/m^2$).

Module de signalisation à DEL – Réseau de DEL associé à une lentille qui peut produire un signal lumineux circulaire. Un module de signalisation à DEL doit pouvoir remplacer l'unité optique d'un feu de passage à niveau rail-route actuel.

Procédure de stabilisation de la lumière – Procédure par laquelle on excite un module de signalisation à DEL à une température donnée et durant une période spécifiée pour stabiliser l'intensité lumineuse.

Puissance consommée – Puissance en watts consommée par un module de signalisation à DEL utilisé sous une tension de fonctionnement nominale dans une gamme de températures de fonctionnement ambiantes.

Puissance nominale – Puissance initiale moyenne (en watts) consommée quand le feu est utilisé à la tension nominale.

Source à DEL – Diode électroluminescente (DEL) unique ou réseau de DEL.

Tension nominale – Tension de fonctionnement nominale ou prévue pour le module de signalisation à DEL; tension à laquelle sont déterminées les valeurs nominales de la puissance, de l'intensité lumineuse et de la durée de vie.

EXIGENCES PHOTOMÉTRIQUES

Intensité lumineuse

Les intensités lumineuses conservées par les modules de signalisation à DEL pour passages à niveau pendant la période d'utilisation prévue de 10 000 heures et dans toutes les conditions de fonctionnement normales (température entre -40 °C et 70 °C et tension entre 8,5 et 14 V c.a./c.c.) ne doivent pas être inférieures aux valeurs indiquées dans le tableau B-1.

Tableau B-1 – Intensité lumineuse minimale (candelas) sur la gamme de températures de fonctionnement et durant leur durée de vie

	0°	***5° G/D***	***10° G/D***	***15° G/D***	***20° G/D***	***25° G/D***	***30° G/D***
0°	400	375	250	150	75	40	15
5° B	350	325	250	150	75	40	15
10° B	130	125	110	85	60	35	15
15° B	45	40	35	30	25	20	15
20° B	15	15	15	15	15	15	10

Chromaticité

Un module de signalisation doit produire une lumière rouge uniforme conforme à la norme *Equipment and Material Standards* (1998), chapitre 2, section 8.04 de l'Institute of Transportation Engineers (ITE).

Uniformité

Le rapport de la luminance la plus forte à la luminance la plus faible sur le module de signalisation ne doit pas dépasser 5:1 sur des surfaces moyennes de 500 mm^2.

Temps de montée et de descente

Le temps de monté maximal entre zéro et l'intensité maximale, et le temps de descente maximal entre l'intensité maximale et zéro doivent être de 75 ms.

EXIGENCES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

Conception du module de signalisation à DEL

Un module de signalisation à DEL doit être conçu pour remplacer le support, le réflecteur et la lentille du module de signalisation actuel dans les boîtiers de signalisation de passage à niveau sans nécessiter de modification des éléments mécaniques, structurels ou électriques de ces boîtiers, qui sont décrits dans le manuel de l'AREMA, partie 3.2.35 (*Recommended Design Criteria for Electric Light Unit for Highway-Rail Grade Crossing Signals Including Light Emitting Arrays and Incandescent Lamps*).

Le module de signalisation à DEL peut mesurer 200 ou 300 mm, et peut inclure une lentille incolore ou rouge.

Les pièces remplaçables d'un module de signalisation à DEL doivent être conçues pour être interchangeables avec des pièces similaires du même fabricant ou du même fournisseur.

Tout joint ou dispositif d'étanchéité similaire doit être fait de matériaux conformes aux spécifications du manuel de l'AREMA, partie 15.2.10 (*Recommended Functional Guidelines for Gasket Material Suitable for Circuit Controllers, Signal Cases and Other Signal Apparatus Housings*).

Facultatif : Une indication visuelle doit être fournie aux équipes de train pour leur permettre de vérifier si les modules de signalisation fonctionnent quand les trains s'approchent des passages à niveau.

Exigences environnementales

Le module de signalisation à DEL doit fonctionner dans une gamme de températures ambiantes allant de -40 °C (-40 °F) à 70 °C (158 °F), conformément à la méthode de test 1010 de la norme MIL-STD-883.

Le module de signalisation à DEL doit être protégé contre la poussière et l'humidité, conformément aux exigences de la norme NEMA 250-1991, sections 4.7.2.1 et 4.7.3.2 pour les boîtiers de type 4.

Le module de signalisation à DEL doit satisfaire aux exigences de protection contre les vibrations et les chocs mécaniques du manuel de l'AREMA, partie 11.5.1 (*Recommended Environmental Requirements for Electrical and Electronic Railroad Signal System Equipment*).

Le module de signalisation à DEL doit être stabilisé contre les ultraviolets.

Identification

Le module de signalisation à DEL doit porter l'information suivante de façon bien visible :

Passage à niveau : DEL, rouge
Classification de déviation du faisceau : Universelle
Tension de fonctionnement : _____
Courant débité sous la tension de fonctionnement : _____
Conforme aux spécifications de Transports Canada : 2002
Numéro de série : _____
Date de fabrication : _____

Si le module ou ses éléments doivent être installés avec une orientation particulière, celle-ci doit être indiquée de façon permanente par une flèche bien en vue.

EXIGENCES ÉLECTRIQUES

Protection contre les tensions transitoires

Les circuits du module de signalisation à DEL doivent être protégés contre les surtensions conformément aux spécifications du manuel de l'AREMA, partie 11.3.3 (*Recommended Design Criteria for Surge Withstand Capability of Electronic Signal Equipment for Signal Systems*).

Circuit d'alimentation des DEL

Les modules de signalisation à DEL doivent fonctionner conformément aux spécifications à toutes les tensions probables dans les conditions de fonctionnement normales d'un feu de passage à niveau. Plus exactement, pour les infrastructures de signalisation de passage à niveau actuelles, ils doivent fonctionner conformément aux spécifications sur une gamme de tensions allant de 8,5 à 14 V. Le fabricant doit fournir un graphique de l'intensité dans l'axe en fonction de la tension appliquée dans la gamme 0-18 V.

Les modules de signalisation doivent être conçus de façon à ne pas être endommagés par une surtension modérée. Spécifiquement, pour les infrastructures de signalisation de passage à niveau actuelles, ils ne doivent subir aucune défaillance quand ils sont alimentés par une source c.a. ou c.c. dont la tension peut atteindre 18 V.

Les modules ne doivent pas consommer plus de 2 ampères sur la gamme des tensions probables dans des conditions de fonctionnement normales à un passage à niveau. Le fabricant doit fournir un graphique du courant consommé en fonction de la tension entre 0 et 18 V.

La polarité des modules alimentés par une source à courant continu ne doit apparaître qu'à l'intérieur de l'unité et il ne doit pas être nécessaire de connaître la polarité du module pour le connecter aux bornes des boîtiers existants.

Les connexions électriques doivent être effectuées au moyen de fils de cuivre torsadés et isolés assez gros pour permettre de fournir un courant de fonctionnement maximal à la source lumineuse. Le calibre des fils ne doit jamais être inférieur à 16 AWG et les câbles doivent être terminés par des connecteurs à préhension compatibles avec les bornes des boîtiers. Aucun connecteur intermédiaire ou autre type d'adaptateur ne doit être exigé.

Les sources DEL individuelles doivent être câblées de telle façon qu'en cas de défaillance de l'une d'elles la perte d'intensité lumineuse du module de signalisation ne dépasse pas 20 %.

Interférences diélectriques et électromagnétiques

Les circuits du module de signalisation à DEL doivent être conformes aux exigences de protection contre les interférences électriques et électromagnétiques pour l'équipement de classe B qui sont spécifiées dans le manuel de l'AREMA, partie 11.5.1 (*Recommended Environmental Requirements for Electrical and Electronic Railroad Signal System Equipment*).

EXIGENCES D'ASSURANCE DE LA QUALITÉ

Généralités

Programme d'assurance de la qualité

Le module de signalisation à DEL doit être fabriqué conformément au programme d'assurance de la qualité du fournisseur. Ce programme doit comporter deux types d'assurance de la qualité : 1) une assurance de la qualité de conception, et 2) une assurance de qualité de fabrication. L'assurance de la qualité de fabrication doit comporter des tests périodiques statistiquement contrôlés visant à garantir des niveaux de performance minimale par les modules de signalisation fabriqués de façon à satisfaire à la présente spécification.

Tenue des registres

La documentation sur l'assurance de la qualité et les résultats des tests devront être conservés durant sept ans, au moins.

Conformité

Les modules de signalisation à DEL qui n'ont pas subi avec succès les épreuves de qualification de la conception et ne satisfont pas aux exigences de performance dans les tests d'assurance de la qualité de production ne doivent pas être étiquetés, annoncés ou vendus comme étant conformes à la présente spécification.

Épreuves de qualification de conception

Déverminage

On fera clignoter trois modules de signalisation à DEL durant 24 heures, au moins, à un coefficient d'utilisation de 50 % et à une température ambiante de 60 °C (+140 °F) avant de les soumettre aux épreuves suivantes.

Intensité lumineuse

Après une période d'utilisation continue d'une heure sans clignotement, l'intensité lumineuse des trois modules de signalisation sera mesurée à une température ambiante de 25 °C à la tension de fonctionnement prévue. Ces mesures seront consignées dans un tableau d'intensités lumineuses aux points indiqués dans le tableau B-1.

Effets de la température
La performance des trois modules en fonction de la température sera ensuite mesurée. On mesurera l'intensité lumineuse dans l'axe après un fonctionnement continu durant une heure à 70 °C. L'intensité lumineuse sera ensuite mesurée à intervalles de 10 °C jusqu'à -40 °C. Le fabricant doit fournir un graphique de l'intensité lumineuse dans l'axe en fonction de la température dans cette gamme de températures, et un facteur de correction pour la situation la plus défavorable.

Effets de la tension
On mesurera l'intensité lumineuse des trois modules de signalisation dans la gamme de tensions 0-18 V à 25 °C. Le fabricant doit fournir un graphique de l'intensité lumineuse en fonction de la tension dans cette gamme de tensions, ainsi qu'un facteur de correction pour la situation la plus défavorable en ce qui concerne l'intensité lumineuse dans la gamme de tension 8,5-14 V c.c. (ou toute autre gamme couvrant toutes les tensions qui peuvent vraisemblablement être appliquées dans l'utilisation sur le terrain).

Effets de l'âge
Le fabricant doit indiquer l'intensité du courant qui traverse les diodes du module de signalisation et, en se basant sur les estimations de dégradation de l'intensité lumineuse des diodes avec le temps fournies par les fabricants de diodes, établir un facteur de correction après 10 000 heures d'utilisation à la température ambiante.

Version corrigée du tableau des intensités lumineuses
Ces trois facteurs de correction seront utilisés pour ajuster les entrées du tableau des intensités lumineuses, lequel sera ensuite comparé avec le tableau 1 de la spécification. Toutes les mesures corrigées, de fait ou en essence, doivent satisfaire aux exigences du tableau B-1.

Chromaticité

On mesurera la chromaticité des modules de signalisation pour vérifier la conformité aux exigences de cette norme. Les mesures seront effectuées à la température ambiante de 25 °C (77 °F).

Uniformité

On vérifiera l'uniformité de la luminance des trois modules de signalisation. Le rapport de la plus grande à la plus petite luminance d'un module ne doit pas dépasser 5:1 sur des zones d'une surface moyenne de 500 mm^2, les mesures étant effectuées selon les spécifications du *Guide pour l'établissement des projets de feux de circualtion routière* (1988) de la CIE.

Résistances aux vibrations mécaniques

On vérifiera les trois modules de signalisation pour s'assurer qu'ils se conforment aux spécifications concernant les vibrations mécaniques pour l'équipement extérieur (classe B) du manuel de l'AREMA, partie 11.5.1 (*Recommended Environmental Requirements for Electrical and Electronic Railroad Signal System Equipment*). Tout jeu dans la lentille ou autre élément interne quelconque, ou tout dommage matériel, sera un motif de rejet.

Protection contre l'environnement

Cyclage en température
On effectuera un cyclage en température sur un échantillon de trois modules de signalisation conformément à la norme MIL-STD-883, méthode de test 1010. La gamme de températures ira de -40 °C à 70 °C. On exécutera 20 cycles, au moins, avec un temps de transfert de 30 minutes entre les températures extrêmes et un temps de maintien de 30 minutes à chaque température. Les feux soumis à l'épreuve ne doivent pas être en mode de fonctionnement normal. Toute défaillance ou tout indice de fissure sur la lentille ou le boîtier après le cyclage en température sera un motif de rejet.

Résistance à l'humidité
On effectuera une épreuve de résistance à l'humidité sur les trois modules de signalisation pour en vérifier la conformité à la norme NEMA 250-1991 pour les contenants de type 4. Toute indication d'humidité interne après l'épreuve sera un motif de rejet.

Caractéristiques électriques

Courant
On mesurera l'intensité du courant (ampères) dans les trois modules de signalisation. Les intensités mesurées seront utilisées pour effectuer une comparaison de la qualité des modules de production dans le cadre de l'assurance de la qualité de production. Le fabricant doit fournir un graphique du courant consommé en fonction de la tension entre 0 et 18 V à 25 °C. L'intensité moyenne du courant ne doit pas dépasser 2 A quand la tension appliquée se trouve entre 8,5 et 14 V.

Appel de courant
L'appel de courant (courant à la mise sous tension) sera mesuré et indiqué sous la forme d'un pourcentage du courant de fonctionnement.

Bruit électronique
On vérifiera si les trois modules de signalisation sont conformes aux exigences concernant les limites d'émission de classe A mentionnées au titre 47, sous-partie B, section 15 des spécifications de la Federal Communications Commission (FCC).

Caractéristiques diélectriques
On vérifiera si les caractéristiques diélectriques des trois modules de signalisation sont conformes aux exigences de classe B du manuel de l'AREMA, partie 11.5. (*Recommended Environmental Requirements for Electrical and Electronic Railroad Signal System Equipment*, Class B).

Insensibilité aux transitoires
On vérifiera l'insensibilité aux transitoires des trois modules de signalisation en suivant la procédure décrite dans le manuel de l'AREMA, partie 11.3.3. (*Recommended Design Criteria for Surge Withstand Capability of Electronic Signal Equipment for Signal Systems*).

Épreuves d'assurance de la qualité de production

Les lots de production des modules de signalisation à DEL seront statistiquement échantillonnés selon les procédures standard d'assurance de la qualité de production. Les modules échantillons seront soumis aux épreuves d'assurance de la qualité suivantes.

Déverminage

On fera clignoter trois modules de signalisation à DEL durant 24 heures au moins à un coefficient d'utilisation de 50 % et à une température ambiante de 60 °C (+140 °F) avant de les soumettre aux épreuves suivantes.

Intensité lumineuse minimale conservée

On mesurera l'intensité lumineuse dans l'axe de tous les modules échantillons après une heure de fonctionnement continu (ou, autrement, après une correction représentative de l'effet d'une heure de fonctionnement continu) à 25 °C et à la tension de fonctionnement prévue. L'intensité lumineuse mesurée doit être d'au moins 400 cd dans les situations les plus défavorables de température (entre -40° et 70 °C), de tension, (entre 8,5 et 14 V), après 10 000 heures d'usage, en utilisant les facteurs de correction déterminés par les procédures d'assurance de la qualité de conception. Les modules de signalisation qui n'ont pas l'intensité lumineuse minimale requise seront rejetés.

Consommation de courant

Dans tous les modules échantillons, le courant consommé sera mesuré (ampères) après le déverminage. Les modules pour lesquels la consommation de courant dépasse 120 % du courant nominal à la tension de fonctionnement prévue seront rejetés.

Inspection visuelle

Tous les modules échantillons feront l'objet d'une inspection visuelle visant à vérifier l'absence de tout dommage matériel extérieur ou de toute anomalie d'assemblage. On examinera avec soin la surface de la lentille pour vérifier l'absence d'éraflures (abrasions), de fentes, d'écaillements, de décolorations ou d'autres défauts. La présence de l'un ou l'autre de ces défauts sera un motif de rejet.

ANNEXE C
LISTE DES INTERVENANTS

On trouvera ci-dessous la liste des intervenants qui ont contribué à ce projet par leur participation, des entrevues, ou une rétroaction sur le Web ou en personne. On trouvera un résumé de toutes les rétroactions des intervenants à l'adresse Web : www.railwaycrossings.com.

Comité directeur

- Peter Brackett
  Ingénieur, Canadien Pacifique, Calgary (Alberta)

- Gordon Eisenhuth
  Rail, Navigable Waters Coordinator – Highway Engineering Branch,
  Ministry of Transportation, Victoria (Colombie-Britannique)

- Daniel Lafontaine
  Ingénieur, Gestionnaire, Programme de sécurité - Passages à niveau, Transports Canada, Ottawa (Ontario)

- Frank Lalonde
  Gestionnaire, Ingénierie, Transports Canada – Surface, Montréal (Québec)

- Réal Kirouac
  Ingénieur, Canadien National, Montréal (Québec)

- Peter Mayer
  Chef intérimaire, Systèmes de signalisation, Transports Canada, Ottawa (Ontario)

- Anthony Napoli
  Consultant, Centre de développement des transports, Transports Canada, Montréal (Québec)

- John Sharkey
  Directeur général, Marketing, Safetran, Elgin (Illinois), É.-U.

- Sesto Vespa
  Agent principal de développement, Centre de développement des transports, Transports Canada, Montréal (Québec)

Fabricants et distributeurs

- Dominic Balthazar,
  Chef de produit, GELcore

- Martyn Cook
  Marketing Director, Vega Industries, Nouvelle-Zélande

- Kirk Knight
  Ventes et commercialisation, General Signals Inc.

- Frank Legge
  Chef de produit, Milrail

- Paolo Paoletta
  Spécialiste des marchés, GELcore

- Richard Present
  Chef du développement commercial, Dialight

- Nicolas Saint-Germain et Claude Boisvert
  Ingénierie, GELcore

- John Sharkey
  Directeur général, Marketing, Safetran

- Emmett Smith
  Ingénieur d'application, Agilent

- William Wilson
  Directeur canadien, Safetran

- Lenny Wydotis
  Ingénieur, Safetran

Industrie ferroviaire

- James Cheeks
  Comité de l'ITE

- René Laflèche et Ray Kroeker
  Ingénieurs, Canadien National

- Robert W. McKnight
  Historien de la signalisation ferroviaire

- Bob Nash
  Directeur général, Signalisation, Canadien Pacifique

- Stephen Patrick
  Ingénieur, Développement et assurance de la qualité – Signalisation et communications, Canadien Pacifique

- Dan Van Alstine
  Président, Rail Development Group, LLC, Lima (New York)

Organismes de réglementation gouvernementaux

- Mike Coghlan
  Directeur, Ingénierie, Sécurité ferroviaire, Transports Canada

- Gary Drouin
  Administrateur national de Direction 2006, Transports Canada

- Ivan Mann
  Gestionnaire, Sécurité ferroviaire, Région du Pacifique, Transports Canada - Surface

- Ron Mitchell
  Chef, Sécurité ferroviaire - Ingénierie, Région du Pacifique, Transports Canada

- Allan Neilson,
  Chef, STE (Signals Telecomms and Electrical) Infrastructure, TranzRail Limited, Nouvelle-Zélande

- Sandy Quesnel
  Ministry of Transportation, Colombie-Britannique

- John Riley
  Gestionnaire, Signalisation aux passages à niveau, Région du Pacifique, Transports Canada

Milieu juridique

- Kenneth A. Stevenson
  Q.C., Priel, Stevenson, Hood & Thornton, Saskatoon (Saskatchewan)

Milieu universitaire

- Matthew Chatham
  Étudiant diplômé, Université de l'Alabama

- Joey Parker
  Professeur agrégé, Université de l'Alabama

Centre de développement
des transports

800, bd. René-Lévesque Ouest
Bureau 600
Montréal (Québec)
H3B 1X9

www.tc.gc.ca/tdc/index_f.htm